GREGORY J. GBUR

INVISIBILITÀ

Storia e scienza del non essere visti

APOGEO

GREGORY J. GBUR
INVISIBILITÀ
Storia e scienza del non essere visti
APOGEO

Invisibilità

Storia e scienza del non essere visti

Gregory J. Gbur

APOGEO

Alla mia amica Kayla Arenas con i miei più profondi ringraziamenti,
e alla mia compagna di stanza Sarah Addy, per tutto il suo sostegno.

Capitolo 1

Quella volta in cui sbagliai previsione

> Non c'è alcun motivo per cui una persona debba avere un computer in casa.
> – Attribuita a Ken Olsen, fondatore di Digital Equipment Corporation, 1977

Come ben sappiamo, il progresso scientifico è piuttosto difficile da prevedere. La storia della scienza è piena di esempi di previsioni spettacolarmente sbagliate, fatte da persone rispettabilissime. In una serie di conferenze sul tema "Le onde luminose e i loro impieghi", per esempio, il famoso fisico Albert A. Michelson aveva sostenuto: "Le leggi fondamentali e i fatti più importanti della scienza fisica sono stati tutti scoperti, e sono stabiliti così saldamente che la possibilità che vengano mai soppiantati in seguito a nuove scoperte è estremamente remota"[1]. Michelson ha fatto questa affermazione nel 1899; nel giro di pochi anni, però, l'introduzione della teoria della relatività e della meccanica quantistica avrebbero completamente ribaltato quella concezione della fisica. La teoria ristretta della relatività di Einstein descrive come il movimento degli oggetti sia molto diverso quando la loro velocità relativa è vicina a quella della luce, e la meccanica quantistica descrive come il comportamento della luce e della materia a scale estremamente piccole sia molto diverso da quello che vediamo nella vita quotidiana. Quelle due teorie hanno trasformato la nostra concezione della fisica e dell'universo, e ci hanno portato a nuove idee che ancora oggi non siamo riusciti a comprendere a pieno.

Non si può biasimare seriamente Michelson: basava la sua affermazione sulle conoscenze scientifiche disponibili al suo tempo. Alcune previsioni però sono condannate al fallimento semplicemente per mancanza di comprensione della scienza nota. Un esempio imbarazzante si trova in un editoriale del *New York Times* del 13 gennaio 1920, in cui un anonimo redattore attaccava il professor Robert Goddard, pioniere delle ricerche sui razzi, e derideva come impossibile la sua idea di inviare un razzo al di fuori dell'atmosfera terrestre:

> E non si può non essere meravigliati e a disagio, e lo si può dire tranquillamente perché, quando il razzo esce dall'atmosfera e inizia realmente il suo lungo viaggio, il suo volo non sarebbe né accelerato né mantenuto dall'esplosione delle cariche che potrebbe ancora portare. Sostenere una cosa simile significherebbe negare una legge fondamentale della dinamica, e solo il dottor Einstein e i suoi seguaci, così pochi e selezionati, hanno il permesso di farlo.
>
> Quel professor Goddard, con la sua "cattedra" al Clark College e il rispetto della Smithsonian Institution, non conosce la relazione fra azione e reazione, e la necessità di avere qualcosa di meglio di un vuoto rispetto a cui fare reazione – sostenerlo sarebbe assurdo. Ovviamente sembra che sia solo privo delle conoscenze che vengono impartite quotidianamente nelle scuole superiori.[2]

L'autore di questo articolo piuttosto offensivo dava erroneamente per scontato che un razzo derivi la sua spinta dai gas di scarico che esercitano una pressione contro l'atmosfera. Un razzo nello spazio, però, deriva la sua spinta dalla Terza legge del moto di Newton, la quale afferma che a ogni azione corrisponde una reazione uguale e opposta: i gas che fuoriescono posteriormente dal razzo hanno come conseguenza il movimento in avanti del razzo stesso. Il 17 luglio 1969, quando gli astronauti della missione Apollo sono partiti per la loro prima discesa sulla Luna, il *Times* ha pubblicato questa correzione: "Ulteriori indagini ed esperimenti hanno confermato quanto aveva scoperto Isaac Newton nel XVII secolo e ora è definitivamente stabilito che un razzo può funzionare nel vuoto così come nell'atmosfera. Il *Times* si rammarica dell'errore". Quindi, le

previsioni a proposito della scienza sono doppiamente pericolose: possono dimostrarsi sbagliate a causa di conoscenze non ancora acquisite, e possono dimostrarsi sbagliate a causa di un fraintendimento fondamentale della scienza nota.

Sapendolo, avrei dovuto stare più attento quando mi è stato chiesto di fare qualche commento sul futuro della scienza.

Il 25 maggio 2006 due gruppi di ricercatori (che avevano lavorato in modo indipendente) hanno annunciato la pubblicazione sulla rivista *Science* dei loro articoli, in cui delineavano a livello teorico come progettare un "mantello dell'invisibilità". Il primo articolo, "Optical Conformal Mapping", era scritto da Ulf Leonhardt, a quel tempo all'Università di Saint Andrews in Scozia; il secondo, "Controlling Electromagnetic Fields", era scritto da John Pendry dell'Imperial College a Londra, insieme con David Schurig e David Smith della Duke University in North Carolina. Nonostante i titoli molto tecnici, gli articoli avevano implicazioni entusiasmanti: entrambi descrivevano strategie simili per la progettazione di un dispositivo in grado di guidare la luce attorno a una regione centrale nascosta e riportarla sulla sua strada, come se non avesse incontrato alcunché. Il dispositivo in linea di principio avrebbe "rivestito" un oggetto al suo interno impedendone il rilevamento, di fatto rendendolo invisibile[3].

Probabilmente ero entusiasta di questi risultati più di chiunque altro, poiché la mia ricerca di dottorato, completata nel 2001, era collegata ai primi tentativi di descrivere l'invisibilità in fisica. Nel 2003, in un convengo a Kiev, in Ucraina, mi è capitato di parlare un po' del mio primo lavoro con Ulf Leonhardt, un altro partecipante. La ricerca del 2006, però, ha veramente cambiato le carte in tavola e ha portato gli scienziati a pensare che l'invisibilità sia non solo possibile ma anche effettivamente realizzabile.

Naturalmente, le due pubblicazioni hanno catturato l’attenzione di tutto il mondo, e giornalisti e scienziati di ogni dove si sono affannati a capire le implicazioni di quei risultati. Grazie al mio lavoro precedente in questo campo (ne parlerò più avanti), sono stato contattato da vari organi di informazione per parlare di mantelli dell’invisibilità e dei loro usi potenziali. Durante una di quelle interviste mi è stata posta la domanda rischiosa: “Quando pensa che vedremo un mantello dell’invisibilità funzionante?”.

Davanti a una domanda del genere, lo scienziato prova l’istinto naturale di essere prudente. La tecnologia necessaria per realizzare mantelli dell’invisibilità non sembrava esistere ancora nel 2006 e metterla a punto in pratica sarebbe stato piuttosto difficile. Qualsiasi risposta avessi dato sarebbe stata nel migliore dei casi una congettura, e mi sono orientato su “fra cinque anni” per la mia risposta. Quel numero rispecchiava la mia idea che gli esperimenti sarebbero stati difficili e avrebbero richiesto del tempo ma non sarebbero stati impossibili. Se poi mi fossi sbagliato e gli esperimenti non avessero mai avuto successo, nessuno dopo cinque anni si sarebbe ricordato di quello che avevo detto.

La prima dimostrazione sperimentale, invece, è stata pubblicata nel novembre 2006, solo sei mesi dopo la divulgazione dello studio teorico: avevo sbagliato di quattro anni e mezzo![4] Anche se il primo test sperimentale è stato effettuato con le microonde, e non con la luce visibile, e quindi non si trattava di invisibilità nel senso più stretto della parola, dimostrava che i principi dei mantelli dell’invisibilità non erano impossibili come sembrava. È un esempio della tendenza che si è verificata da allora nella scienza dell’invisibilità: è stata piena di sorprese e difficile da prevedere.

Da quegli articoli pionieristici del 2006, tanto le riviste scientifiche quanto gli organi di informazione si sono riempiti di resoconti

mozzafiato che suggerivano che la vera invisibilità fosse dietro l'angolo, che mancasse forse solo una scoperta cruciale perché diventasse realtà. Ecco un piccolo campione dei titoli che preferisco.

- "I mantelli dell'invisibilità sono in vista" (25 maggio 2006).
- "I ricercatori creano un mantello dell'invisibilità funzionale mediante l''effetto miraggio'" (5 ottobre 2011).
- "Siamo un passo più vicino a un vero mantello dell'invisibilità" (26 gennaio 2012).
- "Gli scienziati inventano il mantello dell'invisibilità di Harry Potter – o qualcosa del genere" (30 marzo 2013).
- "Un'azienda canadese ha creato uno scudo dell'invisibilità denominato 'Quantum Stealth'" (21 ottobre 2019).

Una menzione speciale va al titolo che preferisco: "Il 'mantello dell'invisibilità' fa sì che i carri armati sembrino mucche" (9 giugno 2011).

Dati questi titoli, forse potreste ragionevolmente iniziare a chiedervi se non ci sia qualcuno dietro di voi che sta guardando alle vostre spalle quello che state leggendo (non preoccupatevi: non c'è nessuno). Qual è lo stato attuale delle ricerche sull'invisibilità, e come funziona? Funziona davvero? Il libro affronta queste, e altre domande importanti.

E c'è anche altro: scienziati e autori di fantascienza per più di 150 anni hanno studiato il fenomeno dell'invisibilità e hanno cercato di capire come potesse funzionare. Ripercorreremo questa storia, seguendo gli stessi passi che gli scienziati hanno compiuto per comprendere la natura della luce e della materia. Contemporaneamente, vedremo come gli autori di fantascienza abbiano anticipato alcune delle scoperte più notevoli in questo campo. Alla fine, scopriremo che la scienza dell'invisibilità è strana e inaspettata più di quanto abbiano immaginato anche gli scrittori dalla fantasia più fertile.

---

1 Michelson, *Light Waves and Their Uses*, pp. 23-24.

2 “Severe Strain on Credulity”.

3 Leonhardt, “Optical Conformal Mapping”; Pendry, Schurig, Smith, “Controlling Electromagnetic Fields”.

4 Schurig et al., “Metamaterial Electromagnetic Cloak”.

Capitolo 2

Che cosa intendiamo con "invisibile"?

> E appena ebbe pronunciato queste parole, guardò in alto e vide che il Gatto era di nuovo seduto sul ramo dell'albero.
> – Hai detto porcello o pestello? – domandò il Gatto.
> – Ho detto porcello, – rispose Alice; – e vorrei che tu non continuassi ad apparire e a scomparire così improvvisamente: mi fai venire le vertigini!
> – Va bene! – disse il Gatto; e questa volta svanì lentamente, cominciando dalla punta della coda e finendo col sogghigno che rimase là per qualche istante dopo che tutto il resto era sparito.
> "Oh! Ho visto spesso un gatto senza sogghigno," pensò Alice; "ma un sogghigno senza il gatto! Oh! È la cosa più curiosa che abbia visto in vita mia."
> – Lewis Carroll, *Alice's Adventures in Wonderland* (1865) [trad. it. p. 68]

I primi articoli scientifici che descrivevano la fisica dei mantelli dell'invisibilità sono stati pubblicati nel 2006, e sono stati ampiamente, e giustamente, considerati rivoluzionari per la fisica. Potete immaginare quindi quanto sia rimasto davvero stupito nel momento in cui, effettuando le ricerche per questo libro, mi sono imbattuto in un articolo intitolato "Cloaks of Invisibility" ["Mantelli dell'invisibilità"], pubblicato nel 1944 su *Science Newsletter*".[1]

Nonostante il titolo provocatorio, l'articolo riguardava qualcosa di molto più banale: l'uso, da arte delle forze alleate, di astute tecniche di mimetizzazione durante la Seconda guerra mondiale. L'illustrazione di un "buco di ragno" era accompagnata dalla didascalia: "Se foste un soldato nel pacifico campo mostrato nella fotografia in alto e non vedeste alcun segno del nemico, sareste in effetti molto vicini alla

morte” (Figura 2.1). Questi nascondigli prendono il nome dalle tane create da vari ragni, come quelli della famiglia Ctenizidae. Le tane di questi aracnidi hanno una botola mimetizzata e una cortina di seta che consentono ai ragni di tendere un agguato alle loro prede, proprio come i soldati usano queste buche per tendere agguati ai nemici.
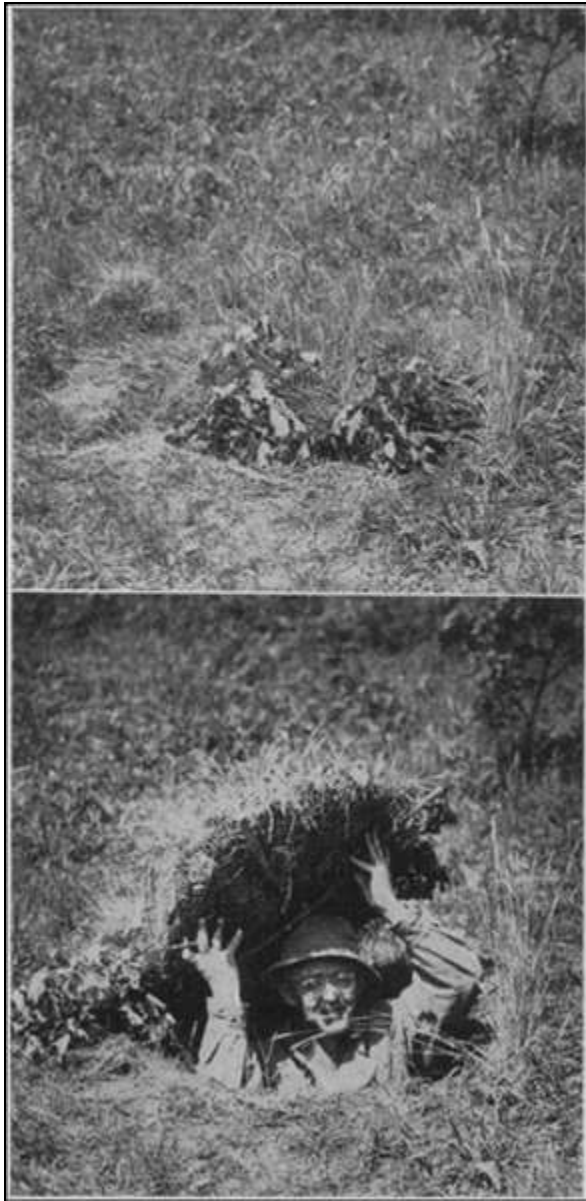
Figura 2.1 Un “buco di ragno”. Illustrazione da Throne, “Cloaks of Invisibility”, 1944.

Una volta superato il momento di stupore, mi sono reso conto che la mia scoperta evidenziava un problema ricorrente in tutte le discussioni scientifiche dell'invisibilità: la parola "invisibile" è al tempo stesso molto suggestiva, perché fa venire in mente un'immagine specifica (o la sua mancanza), ma anche molto vaga, perché può significare molte cose diverse. Significa "che non può essere visto", ma esistono molti modi per ottenere questo risultato senza ricorrere a una fisica molto raffinata. Se vi nascondete in un buco di ragno, siete invisibili; se spegnete le luci in una stanza senza finestre, siete invisibili. Nel classico sketch dei Monty Python "How Not to Be Seen", i protagonisti ottengono l'invisibilità nascondendosi dietro i cespugli. Oggetti molto piccoli, come batteri, atomi e molecole, non si possono vedere a occhio nudo; anche loro, quindi, sono invisibili. Animali come i polpi e i camaleonti ottengono una sorta di invisibilità adattando la colorazione e i disegni della loro pelle all'ambiente in cui si trovano. Vi mettete una mano sugli occhi? Tutto diventa invisibile per voi.

Chiaramente, dovremo restringere l'uso del termine. Un esempio ci potrà aiutare. Nel 2003, prima della pubblicazione dei famosi articoli sui mantelli, un altro "cappotto dell'invisibilità", creato dal professor Susumu Tachi dell'Università di Tokyo, ha fatto notizia (Figura 2.2). L'effetto del cappotto è piuttosto inquietante: chi lo indossa appare parzialmente trasparente e può muoversi liberamente, mantenendo l'illusione indipendentemente dalla posizione del suo corpo[2].

L'effetto dell'invisibilità si crea con un insieme relativamente semplice di strumenti. Il cappotto è fatto di un materiale catarifrangente che rinvia la maggior parte della luce verso la sorgente; questo si combina con una videocamera che registra la scena dietro la persona che indossa il cappotto e la trasmette a un proiettore sulla parte anteriore. Il proiettore mostra la scena di sfondo sul cappotto,

dando l'illusione della trasparenza, con quella che l'articolo definiva "tecnologia di proiezione catarifrangente".

In questa forma, il cappotto invisibile è ben lontano dal tipo di tecnologia che potrebbe essere utilizzata nello spionaggio o in azioni belliche: l'illusione è efficace solo se vista dalla posizione del proiettore stesso e apparirà disgiunta da altre posizioni. Applicazioni di questo genere però erano ben lontane dagli scopi delle ricerche di Tachi: "Quando gli è stato chiesto se questa tecnologia invisibile potesse avere applicazioni militari, poniamo in una guerra nel deserto, il cinquantasettenne professore ha avuto un sussulto, ben visibile. In conformità con l'etica pacifista profondamente radicata in Giappone, le università in genere stanno lontane dalle ricerche militari"[3].

Figura 2.2 Una dimostrazione del sistema di "mimetizzazione ottica". Per gentile concessione di Susumu Tachi, Università di Tokyo.

Il cappotto di Tachi è nato invece nell'ambito delle sue ricerche sulla telesistenza, l'uso della tecnologia per connettere e controllare oggetti in ambienti remoti, o l'uso di un ambiente virtuale per aumentare un ambiente reale. In testa ai suoi interessi c'era la possibilità di utilizzare la tecnologia in ambito chirurgico: se la proiezione catarifrangente fosse combinata con la visualizzazione del corpo umano mediante risonanza magnetica (MRI), l'immagine degli organi interni di un paziente potrebbe essere proiettata direttamente

sulla sua pelle, e il chirurgo potrebbe essere facilitato nel praticare le incisioni corrette.

Un'altra possibilità interessante, individuata e testata da Tachi, è quella di rendere trasparente l'interno di un'automobile o della cabina di pilotaggio di un aereo, in modo che il guidatore o il pilota possano avere la vista completa in tutte le direzioni e, nel caso delle auto, una consapevolezza precisa della posizione di ostacoli vicini. Più recentemente, un'idea simile è stata proposta e prototipata dalla quattordicenne Alaina Gassler, che ha progettato un sistema di proiezione per rendere trasparenti i montanti del tetto di un'auto, che normalmente creano dei punti ciechi nel campo di vista del guidatore. Gassler ha presentato i suoi risultati al concorso di scienza e ingegneria MASTERS di Broadcom per gli studenti delle scuole medie e meritatamente ha conquistato il primo premio di 25.000 dollari[4].

Questo tipo di invisibilità è quella che chiameremo "invisibilità attiva", in cui il dispositivo misura la luce che illumina l'oggetto da nascondere e poi genera nuova luce per creare l'illusione. Questo è diverso da molto di quello di cui parleremo in questo libro, cioè la "invisibilità passiva", in cui il dispositivo si limita a manipolare e guidare la luce. Schemi di invisibilità come quelli di Tachi e Gassler sono stati utilizzati per scopi più frivoli: nel 2012, Mercedes-Benz ha creato una "auto invisibile" per promuovere i suoi veicoli a idrogeno a basse emissioni[5]. L'auto aveva una videocamera sul fianco destro per registrare la scena e una matrice di LED sul fianco sinistro per proiettare l'immagine registrata. Come negli esempi precedenti, l'illusione funzionava solo quando l'auto veniva vista dall'angolazione adatta (in questo caso, direttamente di fronte al suo fianco sinistro) e nella maggior parte dei casi era ben lontana dal risultare veramente invisibile. L'idea forse era venuta dalla Aston Martin V12 Vanquish,

l’auto invisibile di James Bond comparsa nel film *La morte può attendere* (2002).

Questo ci riporta alla domanda di partenza: che cosa intendiamo per invisibilità? Né il cappotto di Tachi né l’auto di Mercedes-Benz sono veramente invisibili nel senso stretto del termine. Entrambi sono piuttosto casi di trasparenza e l’illusione che creano è efficace solo quando l’osservatore si trova in una posizione particolare. Rappresentano comunque tentativi di utilizzare la scienza e la tecnologia per rendere un oggetto più difficile da vedere, e sarebbe un peccato escluderli dalla nostra definizione; inoltre, come scopriremo, non è del tutto chiaro se sia possibile, anche in linea di principio, rendere perfettamente invisibile un oggetto. Molti dei tipi di invisibilità che esamineremo nel corso del libro presentano limiti significativi. Per esempio, l’oggetto può apparire perfettamente invisibile solo quando viene visto o illuminato da una certa angolazione, come il cappotto di Tachi, oppure può essere invisibile solo per una certa gamma di colori della luce.

Come definizione operativa, dunque, proviamo questa: considereremo invisibili gli oggetti se manipolano la luce in modo inusuale e si rendono più difficili da vedere di quello che normalmente ci aspetteremmo. Questa definizione esclude casi semplici come nascondersi dietro un divano o spegnere la luce, ma include esempi curiosi come quelli che abbiamo visto prima, e altri che incontreremo più avanti.

Il cappotto dell’invisibilità di Tachi ci offre un altro insegnamento importante. Influenzati dai racconti di fantascienza, siamo abituati a pensare che l’invisibilità sia un potere sinistro, che può essere sfruttato per provocare gravi danni, ma l’invisibilità ha anche un numero sorprendente di applicazioni positive, per esempio per scongiurare

incidenti d’auto o come ausilio nella chirurgia. Vedremo altri esempi di questi potenziali impieghi futuri inaspettati.

---

1 Thone, *Cloaks of Invisibility*.

2 “Japanese Scientist Invents ‘Invisibility Coat’”; Tachi, “Telexistence and Retroreflective Projection Technology”.

3 Brooke, *Tokyo Journal*.

4 Diaz, “Teenager Wins $25,000”.

5 Mercedes-Benz, “Mercedes-Benz Invisible Car Campaign”.

Capitolo 3

La scienza incontra la fantasia

Non immaginava certo che cosa stesse per succedere, quando entrò sotto il pergolato, pieno di gelsomini, caprifogli e rose e si lasciò cadere su una panchina, dove aveva passato molte ore, quasi in trance, con Alicia. “Mi piacerebbe sapere di che cosa stanno parlando”, esclamò. “Vorrei essere invisibile!”
Non c’è desiderio che possa essere più ridicolo, ma in quel momento colpì la sua fantasia, e lo ripeté di nuovo; poi lasciò che la sua immaginazione si trastullasse con quell’idea per un minuto o due e si entusiasmò a tal punto con le possibilità che gli si presentavano, che esclamò nuovamente: “Che cosa meravigliosa sarebbe! Vorrei proprio essere invisibile!”.
Il numero tre è onorato da molto tempo per la sua potenza, nel bene come nel male; e la sua terza esclamazione gli era appena sfuggita dalle labbra, che udì un breve colpo di tosse, a pochi metri dal luogo in cui era seduto. Alzatosi immediatamente, sbirciò fra la cortina di viticci, e vide un estraneo che camminava lentamente verso il pergolato.
– James Dalton, *The Invisible Gentleman* (1865)

Nel classico film *Scontro di titani* (1981), il giovane Perseo si sveglia sorpreso nell’anfiteatro della città di Giaffa, dove è stato trasportato dalla dea Teti per vendetta nei confronti di Zeus, il re degli dei, che non è felice del suo operato. Per aiutare il figlio che ora è finito in mezzo ai pericoli del grande mondo, Zeus fa scendere nell’anfiteatro tre doni per lui: un robusto scudo riflettente, una spada in grado di tranciare il marmo e un cappello che rende invisibile chi lo indossa. Al termine della sua avventura, Perseo troverà una buona applicazione per tutti i tre oggetti.

La trama di *Scontro di titani* si basa liberamente sulla mitologia greca, che risale a duemila anni fa. Il mito di Perseo ha avuto varie trasformazioni nei secoli, ma una delle versioni più influenti è quella

scritta nel primo o secondo secolo nella *Biblioteca* di un autore oggi noto come Pseudo-Apollodoro. (In origine gli studiosi pensavano che l'autore fosse Apollodoro di Atene, ma poi sono state trovate le prove che così non era. Non sappiamo però chi abbia scritto questo testo, perciò oggi è identificato come Pseudo-Apollodoro.) Secondo il racconto della *Biblioteca*, Perseo usa il berretto [o elmo, a seconda delle traduzioni] di Ade, che garantisce l'invisibilità, per avvicinarsi a Medusa e alle sue sorelle e fuggire con la sua testa.

> […] quando lo portava egli poteva vedere chi volesse ma risultava invisibile agli altri. Dopo avere ricevuto da Ermes una falce adamantina volò verso l'Oceano e trovò le Gorgoni addormentate. Esse erano Steno, Euriale e Medusa. Solo Medusa era mortale: ecco la ragione per cui Perseo era stato mandato a caccia della sua testa. Le Gorgoni avevano il capo avvolto da spire di serpenti, zanne grandi come quelle dei cinghiali, mani di bronzo e ali d'oro con le quali volavano; trasformavano in pietra chi le guardava. Perseo dunque si fermò accanto a loro che dormivano, e Atena guidò la sua mano mentre egli rimaneva voltato e guardava dentro uno scudo di bronzo nel quale poteva scorgere l'immagine riflessa della Gorgone; in questo modo le tagliò la testa. […] Perseo ripose dentro la *kibisis* [un tipo di borsa o di sacca, tenuto legato alla cintura] la testa di Medusa e tornò da dove era venuto; le Gorgoni ora deste balzarono al suo inseguimento, ma non poterono trovarlo grazie al berretto che lo rendeva invisibile.[1]

È dunque da millenni (se non più) che qualcuno ha immaginato i vantaggi (e gli svantaggi) del potere dell'invisibilità.

Una posizione più negativa sull'invisibilità compare nella *Repubblica*, la grande opera filosofica che Platone scrisse intorno al 375 a.C. Dialogando con Socrate, Glaucone presenta la storia dell'anello di Gige, una storia che a prima vista apparirà sospetta per la sua familiarità agli appassionati di fantascienza.

> [Gige, antenato di Creso] era pastore al soldo dell'allora sovrano di Lidia, quando per una violenta tempesta e per un sommovimento del suolo, si squarciò la terra e si aprì una voragine proprio nei pressi del luogo in cui pascolava il gregge.
> Assistere a questi eventi e trasecolare fu tutt'uno. E tuttavia discese in questa voragine, e fra le altre cose straordinarie di cui si favoleggia vide anche un cavallo di bronzo, vuoto di dentro, con delle fenditure. Affacciandosi in esse ebbe modo di scorgere un cadavere che lì giaceva e che sembrava di statura maggiore di quella umana. Questo

> non aveva altro che un anello d'oro su una mano; Gige glielo tolse e se ne uscì.
> Quando si tenne la solita riunione dei pastori, per il rendiconto mensile al re dello stato delle greggi, anch'egli vi andò con al dito il suo anello. Mentre sedeva fra tutti gli altri, casualmente, gli capitò di ruotare il castone dell'anello verso di sé, all'interno, verso il palmo della mano, e, detto fatto, divenne invisibile a quelli che gli sedevano a fianco, i quali parlavano di lui come se se ne fosse andato. Non vi dico la sua meraviglia, tantopiù che, di nuovo mettendo mano all'anello, e ruotandone il castone all'esterno, non appena l'ebbe volto ridivenne visibile. Avendo notato questo fatto, egli ripeté l'esperimento con l'anello per verificare se davvero possedeva quello straordinario potere. Il fenomeno si verificò puntualmente: come girava il castone all'interno scompariva alla vista, come lo girava all'esterno riappariva. Appena ebbe la certezza di questa eccezionale proprietà, si diede subito da fare per essere accolto nella delegazione che doveva recarsi dal re, e, come giunse alla sua corte, ne sedusse la moglie, e col suo aiuto, tramando ai danni del sovrano, riuscì ad ucciderlo e, in tal modo, a impossessarsi del potere.
> Orbene, se di questi anelli ne esistessero due, e l'uno lo infilasse il giusto, e l'altro l'ingiusto, sta' pur certo che nessuno sarebbe a tal punto integro da restar saldo nella giustizia.[2]

Attraverso Glaucone e la storia di Gige, Platone si chiede se la virtù esista solo a causa del timore di essere puniti e se la giustizia stessa, perciò, sia solo un costrutto della società. Con la voce di Socrate, risponde sostenendo che l'uomo che cedesse alla tentazione del potere ultimo sarebbe effettivamente punito perché sarebbe schiavo dei suoi desideri. L'uomo che sceglie di non cedervi mantiene il controllo di se stesso e perciò è felice e libero.

Queste storie sul potere dell'invisibilità e sulla natura corruttrice di tale potere sono state riprese e rielaborate molte volte nel corso del tempo. Platone, lo Pseudo-Apollodoro e quanti li hanno seguiti hanno considerato l'invisibilità un dono degli dei, il frutto di una magia, o un'idea fantastica utilizzabile come metafora o come esempio, ma non realizzabile. In *The Invisible Spy*, scritto da Eliza Haywood nel 1754 (pubblicato con uno pseudonimo), il narratore ottiene una cintura invisibile da un mago mistico; in *The Invisible Gentleman*, scritto da James Dalton nel 1833, il protagonista ottiene l'invisibilità grazie a un desiderio improvviso.

Con l’ampliarsi della conoscenza del mondo naturale, era inevitabile che qualcuno provasse a immaginare se l’invisibilità fosse possibile rispettando i vincoli delle leggi naturali. Non fu uno scienziato a porsi per primo questa domanda, però, ma un autore di fantascienza. Nel 1859, l’autore americano (ma nato in Irlanda) Fitz-James O’Brien pubblicò “Che è stato?”, un racconto che ha la prerogativa di essere la prima storia mai scritta che cerca di dare una spiegazione scientifica dell’invisibilità (Figura 3.1).
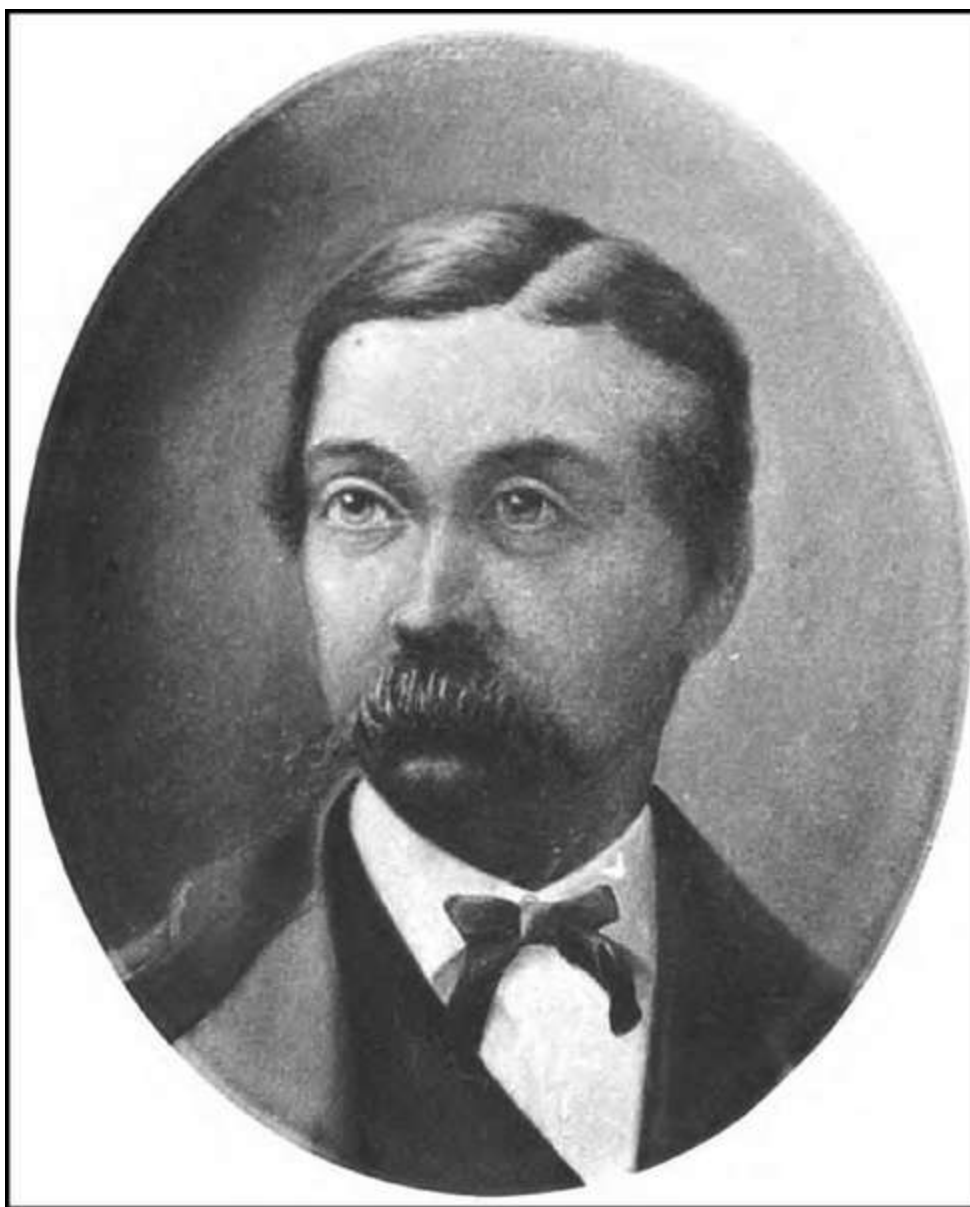
Figura 3.1 Fitz-James O’Brien, ritratto da William Winter. Illustrazione tratta da Winter, “Poems and Stories of O’Brien” (1881).

La vita di Fitz-James O’Brien fu sfrenata, turbolenta e imprevedibile, e si riflette nella varietà dei suoi scritti e nella sua occasionale stranezza. Nato in Irlanda nel 1828 come Michael O’Brien, figlio di un avvocato, mostrò una precoce passione per la poesia, che gli sarebbe stata utile in seguito. Frequentò l’Università di Dublino, poi si trasferì a Londra, dove a quanto pare visse nel lusso,

dissipando in due soli anni l'eredità che il padre gli aveva lasciato. Questo lo spinse a cercare fortuna negli Stati Uniti intorno al 1852, cambiando anche il nome in Fitz-James. Per fortuna, aveva abbastanza influenza in patria da ottenere lettere di presentazione per il mondo letterario di New York e in breve tempo iniziò a scrivere per vari periodici, quotidiani come l'*Evening Post* e il *New York Times*, riviste come *Vanity Fair* e *Atlantic Monthly*.

Una carriera letteraria non era sufficiente per lo stile di vita lussuoso a cui si era abituato e a quanto pare era gravato da debiti per la maggior parte del tempo, viveva dovunque trovasse qualcuno che lo ospitava, e in generale ebbe più momenti difficili che altro. Era un uomo di grande carisma ma di brutto carattere; tra le persone che incontrò si fece amicizie per la vita, ma altre se le alienò rabbiosamente. Un aneddoto eccellente su questa sua duplice natura lo fornì un amico, Thomas Davis, anni dopo la scomparsa di O'Brien.

> Donald McLeod, autore di *Pynnshurst*, un tempo era molto amico di O'Brien, e dormivano nello stesso letto. Una sera, subito dopo essersi ritirati per dormire, nacque fra loro un'accesa discussione in merito alla nazionalità scozzese e irlandese, e O'Brien espresse opinioni che al suo compagno scozzese non piacquero affatto. "Non posso tollerarlo", urlò McLeod. "Fate come volete", disse O'Brien. "Domando soddisfazione, signore!", urlò McLeod. "Molto bene", rispose Fitz-James, altrettanto adirato e bellicoso, mentre tirava su le coperte, "molto bene, signore; sa dove trovarmi domattina". Quest'ultima affermazione, anche se era stata fatta in mortale sincerità, ebbe l'effetto di trasformare il litigio in una risata, e la faccenda finì lì.[3]

Quando nel 1861 scoppiò la Guerra civile, O'Brien si arruolò nel Settimo reggimento della Guardia nazionale di New York, sperando di essere inviato al fronte, per combattere per l'Unione. Il reggimento però fu schierato solo a difesa di Washington e fu congedato dopo un mese di servizio. Senza scomporsi, O'Brien cercò di avere un incontro con lo staff di un generale e riuscì ad assicurarsi un posto con il generale Frederick W. Lander sul fronte in Virginia all'inizio del 1862. Lì fu a fianco del generale in una carica contro le forze confederate a

Bloomery Gap, in quella che è oggi è la Virginia occidentale, il 14 febbraio, fra i pochi che ebbero abbastanza coraggio da affrontare a cavallo il fuoco nemico. Vari giorni più tardi, O'Brien guidava una compagnia di cavalieri per requisire del bestiame appartenente al nemico, quando il suo gruppo si imbatté in una forza ostile, superiore numericamente per quattro uomini a uno. Senza timori, O'Brien comandò la carica. "Mentre avanzavano, l'ufficiale dei ribelli alzo la mano e urlò: 'Fermi! Chi siete?'. O'Brien gli urlò in risposta: "Soldati dell'Unione!" e gli sparò. Fu il segnale di uno scontro generale. I ribelli avrebbero potuto facilmente catturare un gruppetto tanto inferiore numericamente, ma l'assalto di O'Brien era stato così audace che pensarono avesse da qualche parte dei rinforzi."[4] Le forze unioniste riuscirono a scacciare il nemico, ma O'Brien non fu altrettanto fortunato. Riuscì a uccidere il capo dei ribelli, ma ricevette a sua volta un colpo alla spalla. La ferita era grave, ma a tutta prima sembrava che Fitz-James si sarebbe ripreso. Le sue condizioni però peggiorarono gradualmente e morì il 6 aprile 1862, a soli trentacinque anni d'età.

Le storie strane e fantastiche che O'Brien ha lasciato fanno rimpiangere che la sua carriera si sia interrotta prematuramente. Il racconto di fantasmi "La stanza perduta" (1858) descrive un uomo che incontra spiriti malevoli che hanno occupato lo studio nella sua casa; avventatamente, fa una scommessa con gli spiriti mettendo in palio il possesso della stanza, e la perde completamente: la vede per un ultimo istante, poi la camera scompare dal piano fisico. Il racconto sembra un po' una metafora della vita di vagabondaggi e sconfitte di O'Brien. In "From Hand to Mouth", uno scrittore in difficoltà cerca riparo da una tempesta invernale in un albergo che sembra essere vivo e osservarlo; questa storia, una satira surreale, è anche semi-autobiografica, poiché ritrae cinicamente le difficoltà degli scrittori che si arrabattano per

guadagnarsi di che vivere. Ne “Il forgiatore delle meraviglie”, un gruppo di maghi malvagi cospira per portare in vita dei giocattoli e far loro commettere un omicidio, ma finiscono per scoprire che i loro burattini si rivoltano contro di loro[5].

I racconti di O’Brien che hanno esercitato una maggiore influenza, però, sono quelli che ruotano attorno a idee scientifiche, e all’ottica in particolare. Il suo racconto più famoso, “La lente di diamante” (1857), racconta di un uomo che costruisce il microscopio più potente mai concepito e si innamora della donna microscopica che vede in una goccia d’acqua[6]. Ma “Che è stato?”, pubblicato su *Harper’s Magazine*, è il racconto che ha davvero aperto un nuovo ambito nella fantascienza, con il suo tentativo di spiegare il potere, tradizionalmente inspiegabile, dell’invisibilità[7].

Nel racconto, il narratore, Harry, e l’amico Hammond si trasferiscono nelle stanze di una casa in affitto che si dice sia infestata dai fantasmi. Una notte, mentre è a letto, Harry viene assalito nell’oscurità da una creatura di bassa statura ma di incredibile forza. Lotta con l’umanoide e riesce a vincerlo e a inchiodarlo a terra. Con la mano libera accende la luce, solo per scoprire che ha lottato con un assalitore che è vivo e respira ma è veramente invisibile! Arriva Hammond e i due insieme riescono a legare saldamente la creatura e a stenderla sul letto. Non sanno bene che cosa fare del loro prigioniero, e la creatura non mangia il cibo che le offrono. Diventa progressivamente più debole e muore, e i due lo seppelliscono nel giardino della casa.

Come racconto dell’orrore non è particolarmente spaventoso, ma, come fantascienza innovativa, è molto più convincente. Dopo avere legato bene la creatura, Hammond cerca di calmare l’amico Harry formulando ipotesi su come sia possibile l’esistenza di un tale essere invisibile.

> Ragioniamo un momento, Harry. Qui c'è un corpo solido che possiamo toccare ma che non possiamo vedere. Il fatto è così insolito che ci terrorizza. Non c'è un parallelo di questo fenomeno? Prendiamo un pezzo di vetro puro. È tangibile e trasparente. Solo un minimo di grezzezza chimica impedisce al vetro di essere completamente trasparente e quindi invisibile. Non è teoricamente impossibile, pensaci, fare un vetro che non rifletta neppure un raggio di luce, un vetro così puro e omogeneo nella sua struttura atomica, che i raggi del sole vi passino attraverso come se fosse aria, rifratti ma non riflessi. Noi non vediamo l'aria, eppure possiamo sentirla.[8]

Nel suo tentativo di spiegazione dell'invisibilità, O'Brien fa riferimento a due dei fenomeni dell'ottica osservati sperimentalmente da più tempo: la legge della riflessione e la legge della rifrazione, entrambe discusse nella stessa epoca in cui lo Pseudo-Apollodoro ricamava poeticamente sulle imprese di Perseo. La legge della riflessione dice che l'angolo a cui un raggio di luce viene riflesso da una superficie piana e regolare (per esempio un metallo levigato o il vetro) è uguale all'angolo a cui il raggio incide sulla superficie. Questa legge, che probabilmente era stata identificata già nell'antichità, appare nel libro *Catottrica*, che per molto tempo si è pensato fosse stato scritto dal famoso geometra Euclide intorno al 300 a.C. Si è appurato che questo libro potrebbe essere stato in effetti scritto, in parte o totalmente, da uno o più autori secoli più tardi, perciò l'autore oggi viene indicato come Pseudo-Euclide.

La legge della rifrazione descrive quantitativamente come la direzione della luce cambi quando questa passa da un mezzo trasparente a un altro. Il fenomeno della rifrazione era già noto nell'antichità; nella *Repubblica*, Platone osservava che "lo stesso oggetto si vede curvo o diritto, a seconda che lo si osservi quando è nell'acqua o fuori"[9].Oggi la chiamiamo l'illusione della cannuccia piegata: una cannuccia appare piegata in corrispondenza dell'interfaccia fra aria e acqua in un bicchiere d'acqua (Figura 3.2). La luce riflessa dalla cannuccia sott'acqua cambia direzione quando lascia l'acqua, facendo sì che la cannuccia appaia piegata. Molti

studiosi hanno lavorato per quantificare la legge della rifrazione nel corso dei secoli; oggi il credito viene dato in genere all'astronomo olandese Willebrord Snellius, che ha ricavato la formula corretta nel 1621. Questa legge però è stata scoperta e riscoperta varie volte, e oggi si ammette che il primo a pubblicarla sia stato lo studioso islamico Ibn Sahl circa seicento anni prima, nel 984. Cionostante, la legge viene spesso chiamata "legge di Snell"[10].

Non entreremo qui nei particolari matematici, ma possiamo dire che, quando un raggio di luce passa da un mezzo più rarefatto (dove la velocità della luce è superiore) a uno più denso (dove la velocità della luce è minore), la sua direzione si piega verso la perpendicolare alla superficie[11].
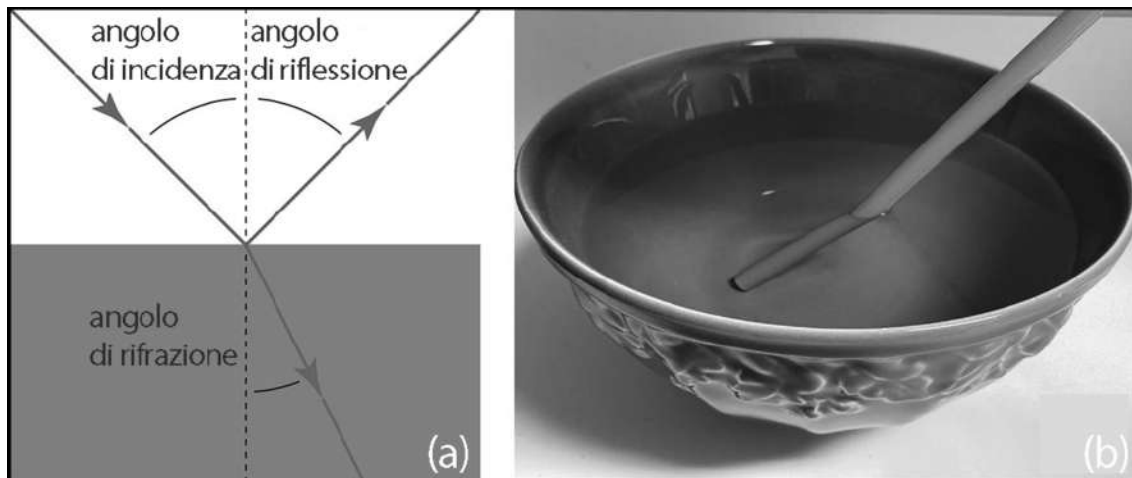
Figura 3.2 (a) Gli angoli di riflessione e rifrazione. (b) L'illusione della "cannuccia piegata", dovuta alla rifrazione.

Quando passa da un mezzo più denso a uno meno denso accade il contrario, e la luce si allontana dalla perpendicolare. La riduzione della velocità della luce rispetto al suo valore nel vuoto è chiamata *indice di rifrazione*, ed è pari a 1,33 per l'acqua, 1,5 per il vetro e 2,417 per il diamante. A indice di rifrazione più elevato corrisponde una maggiore deviazione del raggio di luce. Il diamante ha l'indice di rifrazione più

elevato fra tutti i materiali che si incontrano in natura: per questo O'Brien aveva immaginato di costruire una lente di diamante per ottenere un microscopio di potenza senza uguali (anche se produrre un microscopio potente è molto più complicato, e la scelta del materiale per la lente è solo uno dei tanti aspetti). L'indice di rifrazione dell'aria è di circa 1,0003: la velocità della luce nell'aria è quindi solo leggermente inferiore a quella nel vuoto; vedremo più avanti che questo costituisce una difficoltà importante per la costruzione di dispositivi per l'invisibilità.

Vale la pena notare che riflessione e rifrazione vanno di pari passo: quando la luce incontra una superficie liscia e trasparente, una parte di essa viene riflessa e il resto è rifratto.

L'idea di invisibilità di O'Brien si basava su due ipotesi. La prima è che la luce che viene rifratta in un oggetto non venga altrimenti modificata dal passaggio attraverso quell'oggetto. Può darsi che O'Brien abbia guardato il vetro di una finestra mentre scriveva il suo racconto: è vero che i raggi di luce che attraversano una finestra producono una minima distorsione della scena all'esterno. Se la luce però passa attraverso un oggetto curvo trasparente, come una lente o un mostro invisibile, la situazione è molto diversa. Uscendo da quell'oggetto, i raggi di luce incontrano una superficie inclinata a un angolo diverso da quello della superficie di entrata, perciò escono con un angolo diverso da quello con cui sono entrati. Questo cambiamento di direzione è ciò che permette a una lente di focalizzare la luce, e distorcerebbe l'immagine di qualsiasi cosa si trovi dietro un mostro trasparente, rendendolo rilevabile. Da questo punto di vista, Fitz-James O'Brien aveva torto: la trasparenza non è la stessa cosa dell'invisibilità.

Questo problema dell'invisibilità basata sulla rifrazione sarebbe stato affrontato da un altro autore vari decenni più tardi. Jack London,

famoso per le sue storie ambientate nella natura selvaggia, come il romanzo *Il richiamo della foresta* (1903) e il racconto “Preparare un fuoco” (1908), si è cimentato anche con la fantascienza nel 1906 con il racconto “The Shadow and the Flash” (“L’ombra e il baleno”), che ha come protagonisti due scienziati rivali che escogitano due distinte versioni dell’invisibilità, ciascuna con i suoi limiti (Figura 3.3)[12]. Lloyd Inwood si copre di una vernice perfettamente nera, il che significa che non rifletterà alcuna luce, ma non può evitare l’ombra che getta il suo corpo. Paul Tichlorne, invece, inventa un processo chimico grazie al quale può rendere il proprio corpo perfettamente trasparente, ma la luce che passa attraverso il suo corpo produce per rifrazione lampi brillanti quando si muove: “‘Sono una grande famiglia’, disse, ‘questi cerchi pareli, arcobaleni e aloni. Si producono nella rifrazione della luce dai cristalli minerali e di ghiaccio, dalla foschia, dalla pioggia e dal vapore; e temo che questo sia l’inevitabile scotto da pagare alla trasparenza. Ho eluso l’ombra di Lloyd solo per vedermi balenare questi lampi iridati’.” Alla fine del racconto, i due rivali arrivano a uno scontro mortale su un campo da tennis, producendo uno spettacolo bizzarro di luce e oscurità.
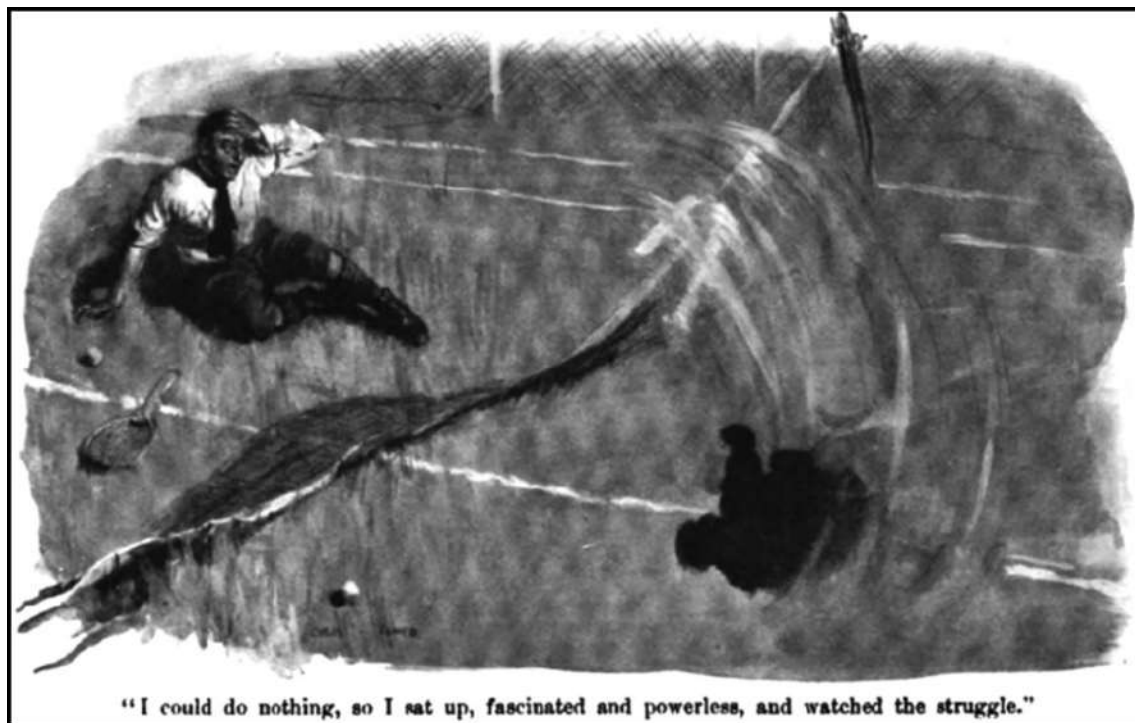
Figura 3.3 Illustrazione originale di Cyrus Cuneo per il racconto di Jack London "The Shadow and the Flash" ("L'ombra e il baleno").

Incidentalmente, l'idea di London di una vernice perfettamente assorbente si è dimostrata profetica. Nel 2014, l'azienda inglese Surrey NanoSystems ha presentato un nuovo materiale denominato Vantablack, che ha conquistato il record mondiale fra i materiali più neri, poiché assorbe il 99,965 percento della luce che lo colpisce[13].Il materiale è costituito da una "foresta" di tubi di carbonio cavi allineati verticalmente, densamente impaccati, del diametro di circa un miliardesimo di metro (un nanometro); il nome Vanta è un acronimo per *Vertically Aligned NanoTube Arrays* (matrici di nanotubi allineati verticalmente). Quando la luce entra in questa foresta, si perde a tutti gli effetti, rimbalzando molte volte da un tubo all'altro prima di essere assorbita.

Il Vantablack ha provocato quasi immediatamente una controversia, quando l'artista Anish Kapoor si è assicurato i diritti esclusivi di

utilizzo in campo artistico di una versione spray del materiale, naturalmente suscitando l'irritazione di altri artisti. Fortunatamente per il mondo dell'arte, sono arrivate in poco tempo anche altre vernici ultranere alternative, alcune addirittura più nere del Vantablack; nel 2019, ingegneri del MIT hanno realizzato un materiale, basato su nanotubi di carbonio, che assorbe il 99,995 percento della luce incidente, un nuovo record. Il materiale è stato immediatamente utilizzato dall'artista Diemut Strebe per una esposizione al New York Stock Exchange (la Borsa di New York), intitolata "The Redemption of Vanity", in cui è stato presentato un diamante da due milioni di dollari rivestito in modo da apparire come un vuoto nero impenetrabile: l'ombra ha battuto il baleno[14].

Ci si potrebbe interrogare sulla plausibilità che anche una vernice super-nera possa rendere invisibile un oggetto. Nel 2018, però, un visitatore di un museo è caduto in una installazione di Anish Kapoor intitolata *Descent into Limbo*, non essendo evidentemente riuscito a riconoscere che la macchia nera sul pavimento era in realtà un buco profondo 2,5 metri[15].Da notare che quell'opera non era neanche stata realizzata con il Vantablack, ma con una vernice molto nera di precedente progettazione.

La seconda ipotesi fondamentale che fa O'Brien a proposito dell'invisibilità è che sia possibile produrre un vetro tanto perfetto che la luce venga "rifratta ma non riflessa". Anche in questo caso l'ottica moderna dimostra che O'Brien si sbagliava: un materiale comune come il vetro, per quanto puro, rifletterà sempre almeno un po' di luce (arriveremo ai materiali non ordinari più avanti). Anche la più pulita fra le finestre di vetro, per quanto può essere difficile vederlo a determinati angoli e nelle condizioni di illuminazione giuste, rifletterà abbastanza luce da essere individuabile da qualche posizione: è tutt'altro che invisibile.

Possiamo perdonare O'Brien per i suoi errori: ha dovuto cavarsela con le informazioni limitate che aveva a disposizione a quel tempo a proposito della luce e della sua interazione con la materia. Ma la sua affermazione per cui il vetro comune ha "un minimo di grezzezza chimica" che lo rende visibile ci fa pensare che, nell'inventare la sua teoria dell'invisibilità, avesse in mente qualche fenomeno fisico molto specifico, e viene naturale la curiosità di capire quale fosse la fonte delle sue idee.

Purtroppo, non possiamo ricorrere alla corrispondenza dello stesso O'Brien per avere qualche indizio: sul letto di morte, nominò due esecutori della sua eredità letteraria e, dopo il suo decesso, tutti i suoi scritti furono inviati a uno di quegli esecutori testamentari, Frank Wood, che avrebbe dovuto leggerli. Non molto tempo dopo, però, anche Frank Wood andò incontro a una morte prematura, e la collezione di documenti in suo possesso andò evidentemente perduta[16].

Ai tempi di O'Brien, però, si sapeva così poco dell'interazione fra luce e materia, che possiamo rapidamente ricondurre il suo ragionamento al padre stesso della fisica moderna, Isaac Newton (1642-1727), il matematico e fisico inglese che si è guadagnato questo appellativo grazie alla sua opera più famosa, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687), in cui ha presentato per la prima volta una legge universale della gravitazione e ha mostrato matematicamente come quella legge potesse spiegare il moto non solo di oggetti celesti come pianeti e satelliti, ma anche di oggetti in caduta vicino alla superficie della Terra. Questa idea, di unificare un campionario molto vario di osservazioni sotto un piccolo numero di leggi fisiche, è diventata un principio guida per tutta la fisica fino all'epoca moderna. Oggi, i fisici delle particelle cercano di dimostrare che le quattro forze fondamentali della natura (gravità, elettromagnetismo, forze nucleari deboli e forti) sono tutte

manifestazioni di un’unica forza, in quella che è chiamata teoria unificata del campo. Un’impresa che rispecchia direttamente quelle pionieristiche di Newton.

Newton non era solo un eccellente matematico e fisico teorico: condusse anche esperimenti molto dettagliati nel campo dell’ottica. Per gran parte le ricerche di ottica prima dell’epoca di Newton si erano concentrate sulle proprietà geometriche della luce e sullo studio di come lenti curve e specchi possano formare immagini degli oggetti per riflessione e rifrazione. Il lavoro di Newton nell’ottica è stato pionieristico perché si è concentrato sulla fisica della luce, sostanzialmente cercando di dare una risposta alla domanda: “Che cosa *è* la luce?”. Il suo contributo più famoso è l’avere capito che la luce bianca è costituita da una combinazione di tutti i colori della luce visibile, cosa che dimostrò separando un fascio di luce bianca in un arcobaleno, mediante un prisma di vetro. Chiunque abbia visto la copertina del classico album dei Pink Floyd *Dark Side of the Moon* ha visto un’illustrazione dell’esperimento di Newton[17].Lo spettro della luce visibile contiene i colori rosso, arancione, giallo, verde, blu e violetto e l’indice di rifrazione è più basso per l’estremità rossa dello spettro, più alto per l’estremità violetta[18].I differenti colori all’interno della luce bianca vengono rifratti in direzioni diverse al passaggio attraverso il prisma.

Newton ha illustrato il primo dei suoi esperimenti nel 1672 presso la Royal Society di Londra, dove la sua scoperta ha incontrato immediatamente resistenza. A quel tempo, i ricercatori erano fortemente divisi fra quanti ritenevano che la luce dovesse essere considerata un flusso di particelle (come il flusso dell’acqua in un fiume) e quanti invece la ritenevano un’onda continua, che si comportava come le ondulazioni sulla superficie di uno stagno. La teoria corpuscolare vantava dalla sua il fatto che la luce viaggia in

linea retta quando è lontana dalla materia, mentre la teoria ondulatoria poteva fare leva sulla propria capacità di spiegare la rifrazione come risultato del cambiamento di velocità delle onde al passaggio da un mezzo all'altro. Newton sosteneva che i suoi risultati dimostravano che la luce era un flusso di particelle.

Molti membri importanti della Royal Society erano fermamente convinti che la luce fosse un'onda, e attaccarono il lavoro di Newton. Uno dei suoi critici più aspri era Robert Hooke (1635-1703), un brillante ricercatore che aveva dato contributi significativi in molti campi, fra cui la microscopia, l'astronomia, la paleontologia, la meccanica e la cronometria (lo studio della misura del tempo). Il suo *Micrographia*, pubblicato nel 1665, contiene le prime illustrazioni di organismi microscopici, e ha stabilito la sua fama come scienziato.

La critica feroce di Hooke a Newton portò a decenni di rivalità, che non si limitò alle critiche ma arrivò ad accuse di plagio, quando Hooke accusò Newton di essersi appropriato di alcune delle sue idee sull'ottica e la gravitazione. La tensione provocata da questa inimicizia, sommata ad altri eventi, portò Newton a un collasso nervoso nel 1678, e per vari anni si ritirò dalla vita pubblica. Il riconoscimento del suo lavoro sulla gravitazione, però, lo rese celebre e diede nuovo impulso alla sua carriera. La rivalità fra Hooke e Newton continuò anche dopo la morte del primo: Newton divenne presidente della Royal Society e si sospetta che sia stato lui a volere la rimozione o la distruzione dell'unico ritratto noto di Hooke, che era appeso nelle sale della Royal Society.

Newton infine pubblicò la sua *Opticks* nel 1704, non a caso un anno dopo la scomparsa del suo acerrimo rivale. Fra i molti esperimenti presentati in quel testo vi sono i tentativi fatti per comprendere la natura della trasparenza: perché alcuni oggetti sono trasparenti e altri no?

Nell’opera più pertinente per la nostra discussione, Newton esaminò la trasparenza dei più piccoli costituenti della materia che riuscisse a trovare. Oggi penseremmo agli atomi ma, nel caso di Newton, parla vagamente delle “parti minime” della materia. Prese materiali trasparenti come il vetro e li ridusse in polvere, osservando che a quel punto diventavano opachi. Viceversa, prese materiali opachi come la carta e li intrise di olio, osservando che a quel punto diventavano trasparenti (se avete mai mangiato una pizza unta su un piatto di carta, avete fatto anche voi questa esperienza).

Newton concluse che le parti minime della materia in generale sono trasparenti, ma che le molteplici riflessioni e rifrazioni della luce in queste parti minime le impediscono di attraversarle. Un vetro ridotto in polvere è opaco a causa delle riflessioni e rifrazioni che si verificano al passaggio della luce fra i corpuscoli; una lastra di vetro è trasparente perché nel materiale fuso mancano tutti quei confini fra corpuscoli.

> Che questa discontinuità delle parti sia, inoltre, la causa principale dell’opacità dei corpi, apparirà se si considera che le sostanze opache diventano trasparenti riempiendo i loro pori con una sostanza qualsiasi la cui densità è uguale o quasi uguale a quella delle parti di esse. La carta bagnata nell’acqua o nell’olio, la pietra denominata *Oculus mundi* immersa nell’acqua, la biancheria oliata o tinta, e molte altre sostanze impregnate di tali liquidi, in modo che pervadano intimamente i loro piccoli pori, divengono con questi mezzi più trasparenti che in precedenza; come, al contrario, sostanze trasparenti al massimo possono essere rese sufficientemente opache sia vuotandone i pori sia separando le parti di esse; come i sali o la carta umida, o la pietra *Oculus mundi*, allorché viene disseccata, o il corno quando viene fatto a pezzetti, il vetro ridotto in polvere, o solantanto incrinato […].[19]

Quindi, Newton sostiene che un oggetto opaco può essere reso trasparente riempiendo gli spazi fra le sue particelle costituenti, per esempio imbevendo la carta in olio, il che riduce la quantità di rifrazione della luce mentre si propaga da parte minima a parte minima.

Per tornare alla descrizione di Fitz-James O’Brien dell’invisibilità, possiamo vedere che probabilmente ricavò le sue idee dalle ricerche

pionieristiche di Newton, o perlomeno dalla descrizione che ne diede qualcun altro. O'Brien ipotizzava che "solo un minimo di grezzezza chimica impedisce al vetro di essere completamente trasparente e quindi invisibile", il che concorda con l'ipotesi di Newton che l'opacità sia completamente dovuta a imperfezioni nel materiale al livello più piccolo.

In un certo senso, quindi, possiamo far risalire proprio fino a Newton le spiegazioni scientifiche dell'invisibilità. Anche se non ha mai fatto ipotesi su mostri invisibili, i suoi tentativi di comprendere la natura della trasparenza avrebbero acceso la fantasia degli autori di fantascienza e, attraverso questi, alla fine anche quella degli scienziati.

Newton però si sbagliava nella sua spiegazione dell'opacità. Come vedremo, l'interazione fra luce e materia in generale è molto più complicata e richiede una comprensione della natura degli atomi stessi, cosa che Newton non aveva possibilità di studiare. La sua spiegazione però funziona per la carta, che è costituita da un insieme di fibre trasparenti separate da intervalli riempiti dall'aria. La luce viene bloccata nel passaggio attraverso la carta da questa foresta di fibre, un po' come il materiale Vantablack intrappola la luce in una foresta di nanotubi di carbonio. Se si imbeve di olio un pezzo di carta, l'olio riempie gli spazi fra le fibre in un modo che riduce le rifrazioni e le riflessioni, e il risultato è la trasparenza.

La spiegazione dell'invisibilità offerta da Fitz-James O'Brien ci dà un'istantanea della scienza ottica al suo tempo: si sapeva ben poco del comportamento della luce, e pressoché nulla delle proprietà degli atomi. La situazione sarebbe cambiata drasticamente nell'arco di pochi decenni e avrebbe portato a nuove concezioni dell'invisibilità, del tutto inimmaginabili in precedenza.

---

1 Apollodoro, *Biblioteca*, 2.4.2-3, pp. 47-48.

2 Platone, *Repubblica,* libro II, 359D-360A, p. 1110.

3 Winter, *Poems and Stories of O'Brien.*

4 *Ibidem*.

5 O'Brien, *Lost Room* [*La stanza perduta*]; O'Brien, *From Hand to Mouth*; O'Brien, *Wondersmith* [*Il forgiatore di meraviglie*].

6 O'Brien, *Diamond Lens* [*La lente di diamante*].

7 O'Brien, *What Was It?* [*Che è stato?*].

8 Ivi [trad. it. p. 166, modificata].

9 Platone, *Repubblica,* libro X, 602C, p. 1312.

10 È così comune che le scoperte scientifiche non prendano il nome da chi le ha effettivamente compiute per primo, che il fenomeno ha una propria legge (ironica), chiamata "legge dell'eponimia di Stigler". Come è giusto, lo stesso Stigler nota che la legge che porta il suo nome è stata formulata la prima volta, a sua conoscenza, dal sociologo Robert K. Merton.

11 La legge della rifrazione dice che $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, dove n_1 e n_2 sono gli indici di rifrazione dei due mezzi e θ_1 e θ_2 sono gli angoli di propagazione nei due mezzi; "sin" è la funzione trigonometrica seno.

12 London, *The Shadow and Flash* [*L'ombra e il baleno*; la citazione seguente è dalle pp. 77-78 dell'edizione Marietti].

13 Coldewey, "Vantablack".

14 Rogers, "Art Fight!"; Chu, "MIT Engineers Develop 'Blackest Black' Material".

15 Liszewski, "Museum Visitor Falls into Giant Hole".

16 Winter, *Poems and Stories of O'Brien.*

17 Questa è una delle strambe connessioni che spesso mi passano per la mente: la copertina con l'arcobaleno di *Dark Side of the Moon* è stata creata da Storm Thorgerson, progettista grafico che nel 1983 è stato il regista del video musicale *Street of Dreams* per la band… Rainbow.

18 Newton indicava i colori come rosso, arancione, giallo, verde, blu, indaco e violetto, ma oggi l'indaco non è più considerato un colore primario distinto dell'arcobaleno. Lo si può trovare incluso, però, perché per chi parla inglese consente di formare una mnemonica utile per ricordare l'ordine dei colori ("Roy G. Biv", da red, orange, yellow, green, blue, indigo, violet).

19 Newton, *Opticks*, p. 249 [trad. it. pp. 483-484].

Capitolo 4

Raggi invisibili, mostri invisibili

> Ora i cespugli erano immobili e tutti i rumori si erano placati, ma Morgan continuava a fissare quel punto con la stessa attenzione di prima.
> “Che cos’è? Cosa diavolo è?” chiesi.
> “È la Cosa Maledetta!” rispose senza voltarsi. La sua voce era roca e innaturale. Tremava visibilmente.
> Stavo per riprendere a parlare quando vidi l’avena selvatica muoversi in modo stranissimo vicino al punto da cui proveniva il trambusto. Era uno spettacolo indescrivibile. Sembrava scossa da una folata di vento, che non lo la piegava, ma la schiacciava, pressandola a tal punto che non riusciva più a rialzarsi; e questo movimento si spostava lentamente verso di noi.
> – Ambrose Bierce, *The Damned Thing* (1893) [trad. it. p. 123]

Circa cinquanta anni prima che Fitz-James O’Brien si mettesse a riflettere sulle possibilità dell’impercettibile, gli scienziati avevano già scoperto un mondo non visibile, anche se di una forma inaspettata e non immaginata. Agli inizi del XIX secolo, alcuni ricercatori avevano scoperto due tipi di luce invisibile a occhio nudo, ma comunque in grado di influire sul mondo materiale. L’idea che esiste un intero universo della fisica nascosto alla nostra percezione diretta avrebbe non solo ispirato gli autori di fantascienza a presentare nuove idee per l’invisibilità, ma anche influenzato, più avanti, la scienza dell’invisibilità in modi davvero sorprendenti. Queste scoperte sarebbero state un pezzo importante del rompicapo da risolvere per risponde alla domanda: che cos’è la luce?

La prima, fortuita, scoperta fu fatta dall’astronomo (e musicista) inglese, ma tedesco di nascita, William Herschel (1738-1822). Nato

nell’Elettorato di Hannover, Herschel sembrava destinato a seguire le orme del padre Isaac, suonatore di oboe nell’esercito. Nel 1755, con il fratello Jakob, si recò in Inghilterra ed ebbe modo per la prima volta di scoprire l’ambiente inglese. All’epoca, re Giorgio II aveva riunito le corone di Gran Bretagna e di Hannover, e la guerra con la Francia spinse i fratelli a tornare ad Hannover per difendere la propria patria. L’esercito di Hannover fu sconfitto però nella battaglia di Hastenbeck, nel luglio 1757.

Temendo per la vita dei propri figli, Isaac Herschel li inviò a cercare rifugio in Inghilterra, più avanti nel corso dello stesso anno. William si mantenne per molti anni grazie ai suoi talenti musicali, come compositore e come esecutore. Imparò a suonare il violino, il clavicembalo e l’organo e trovò lavoro come solista in orchestra e come organista di chiesa.

Anche nella sua attività musicale, Herschel dimostrò un’inclinazione per la risoluzione di problemi, che gli sarebbe servita bene nella sua futura carriera scientifica, come mostra bene un aneddoto raccontato da un organista che si chiamava Miller.

> All’incirca a quell’epoca venne costruito un nuovo organo per la chiesa parrocchiale di Halifax e Herschel fu uno dei sette candidati alla posizione di organista. Tirarono a sorte l’ordine in cui avrebbero dovuto esibirsi per ottenere quel posto: Herschel sarebbe stato il terzo, il secondo invece il Dr. Wainwright di Manchester, le cui dita correvano così veloci che il vecchio Snetzler, il costruttore dell’organo, si mise a camminare agitato per la chiesa: “Diavolo! Diavolo! Lui corre sui tasti come un gatto; non darà alle mie canne lo spazio di parlare”. “Durante l’esibizione del signor Wainwright”, dice Miller, “stavo nel corridoio centrale con Herschel. ‘Quante possibilità avete’, gli chiesi, ‘di superare quest’uomo?’, ed egli rispose: ‘Non lo so; sono sicuro che le mie dita non ce la faranno’. Poi è salito al piano dell’organo e ha estratto dall’organo un suono così ricco, una tale pienezza di armonia lenta e solenne che non riuscivo in alcun modo a spiegarmi quell’effetto…”
>
> “‘Ah’, gridò il vecchio Snetzler, ‘questo è molto bene, molto bene davvero; amo quest’uomo, perché dà alle mie canne lo spazio per parlare’. Chiesi poi al signor Herschel con quali mezzi, all’inizio della sua esecuzione, avesse prodotto un effetto così fuori dal comune, ed egli rispose: ‘L’avevo detto che le mie dita non ce l’avrebbero

fatta!' e, estraendo due pezzi di piombo dalla tasca del panciotto: 'ho messo uno di questi sul tasto più grave dell'organo e l'altro all'ottava superiore; così, adattando l'armonia, ho prodotto l'effetto di quattro mani, invece di due'."[1]

Potrà sembrare che il passaggio da musicista di professione a scienziato sia un po' fuori dal comune, ma la formazione musicale di Herschel non solo lo preparò a quel cambiamento, ma lo favorì effettivamente. Sin da piccolo aveva studiato vari argomenti matematici, perché il padre voleva che conoscesse la teoria musicale e non si limitasse alla pratica. Più avanti, intorno al 1770, Herschel si rivolse di nuovo alla scienza per migliorare le sue competenze musicali. Lesse *Harmonics; or, The Philosophy of Musical Sounds* di Robert Smith, e questo lo portò al *Compleat System of Opticks* dello stesso autore, un libro molto ampio che non solo trattava la teoria della luce e delle immagini, ma forniva anche tecniche pratiche per la progettazione di un telescopio e per le osservazioni di Sole, Luna e altri corpi celesti noti all'epoca. Sembra che proprio la lettura di quel libro abbia suscitato in Herschel la curiosità di vedere con i propri occhi tutte le meraviglie descritte da Smith e lo abbia spinto a dedicarsi all'astronomia[2].

Più o meno nello stesso periodo, fece un'altra scelta che si sarebbe rivelata fondamentale per la sua futura carriera scientifica. La sorella più giovane, Caroline Herschel (1750-1848) era rimasta ad Hannover, dove sembrava destinata a una vita insignificante. La madre aveva limitato l'istruzione di Caroline alle abilità pratiche più elementari, a quanto pare temendo che un'istruzione migliore l'avrebbe spinta a lasciare la sua casa come i fratelli maggiori. Nel 1772, però, William invitò Caroline a raggiungerlo in Inghilterra, per entrare a far parte del coro in cui si esibiva, e la sorella lo raggiunse proprio nell'anno in cui il suo interesse per le stelle stava trasformandosi in un'ossessione. Caroline ebbe successo come cantante, ma finì anche per assistere il fratello mentre lavorava al telescopio: prendeva appunti mentre lui

compiva le sue osservazioni e si assicurava che prendesse i pasti con regolarità. Nel giro di pochi anni il suo ruolo ebbe un'evoluzione, da semplice cameriera ad assistente di laboratorio, che aiutava William nella costruzione di telescopi sempre più grandi e perfezionati, per diventare infine un'astronoma a tutti gli effetti. Finì per scoprire, durante la sua carriera, otto comete e le sue ricerche fecero sì che fosse accolta come membro onorario della Royal Astronomical Society, prima donna in Inghilterra a essere onorata con una posizione governativa ufficiale.

William iniziò a esplorare i cieli nel 1773, ma il suo lavoro astronomico serio iniziò nel 1779 con una ricerca sistematica di stelle visivamente molto vicine fra loro nel cielo. All'epoca si credeva che dallo studio dei cambiamenti apparenti di posizione di quelle stelle doppie si potessero dedurre il loro moto nello spazio e la loro distanza dalla Terra. Nel marzo 1781, mentre compiva la sua catalogazione delle stelle doppie, Herschel osservò nel cielo un oggetto a forma di disco, in precedenza sconosciuto. Aveva compiuto la prima osservazione del pianeta Urano e questa scoperta non solo cementò la sua fama come astronomo di prim'ordine, ma gli procurò anche la prestigiosa posizione di Fellow della Royal Society.

Nel febbraio 1800, William iniziò una serie di osservazioni dirette del Sole con il suo telescopio. Per poter condurre osservazioni del genere in sicurezza, la luce del sole deve essere fortemente attenuata, ed Herschel sperimentò con vari vetri di colori diversi, per filtrare la luce incidente. Come scrisse in seguito: "Quello che appariva notevole era che, quando usavo alcuni di quei vetri provavo una sensazione di calore, ma ottenevo solo poca luce; altri mi davano molta luce, con poca o nessuna sensazione di calore"[3]. Herschel notò, in particolare, che un filtro di colore rosso bloccava molta parte della luce, ma sembra invece consentire il passaggio di una grande quantità di calore.

Tutti sapevano che la luce solare scalda, ma a quel punto Herschel si rese conto che luci di colori diversi potevano portare quantità diverse di calore e che certi colori potevano essere più efficaci di altri nel fornire illuminazione.

Intraprese così una serie di esperimenti per stabilire il potere di riscaldamento e illuminazione di tutti i colori della luce. Con un prisma posto accanto a una finestra creava su un tavolo la proiezione della luce scomposta in un arcobaleno; per valutare l'illuminazione, faceva passare un microscopio attraverso l'arcobaleno e valutava a occhio la visibilità degli oggetti quando erano illuminati da colori diversi. Per valutare il calore, collocava un insieme di termometri con il bulbo nei diversi colori (Figura 4.1).

Scoprì così che gli oggetti risultavano meglio visibili quando erano illuminati da luce gialla, al centro dello spettro, e lo erano di meno quando illuminati con luce rossa o violetta, agli estremi dello spettro. Per quanto riguardava il calore, invece, scoprì che la luce violetta quasi non produceva calore percepibile, e che la capacità termica aumentava progressivamente andando verso l'estremità rossa dello spettro, dove era massima.

A questo punto Herschel trasse una deduzione notevole, che avrebbe rivoluzionato la nostra comprensione della luce. Riconoscendo che il "calore radiante" appare soggetto alle stesse leggi della rifrazione e della diffusione della luce visibile, notava: "Forse che questo non ci porterà a supporre che il calore radiante consista di particelle di luce di un certo intervallo di quantità di moto, e che quell'intervallo possa estendersi un po' oltre, da ciascun lato della rifrangibilità, rispetto a quello della luce?"[4]. In questa frase sono contenuti due enormi salti dell'intuizione. In primo luogo, da molto tempo si dava per scontato che il calore della luce solare fosse un fenomeno distinto dall'illuminazione, mentre qui Herschel ipotizza che il calore radiante

sia una forma di luce in sé oppure un suo sottoprodotto. In secondo luogo, Herschel nota che, poiché il calore appare aumentare fino all'estremo dello spettro visibile, potrebbe aumentare ulteriormente all'esterno dello spettro, dove non si percepisce alcuna luce.
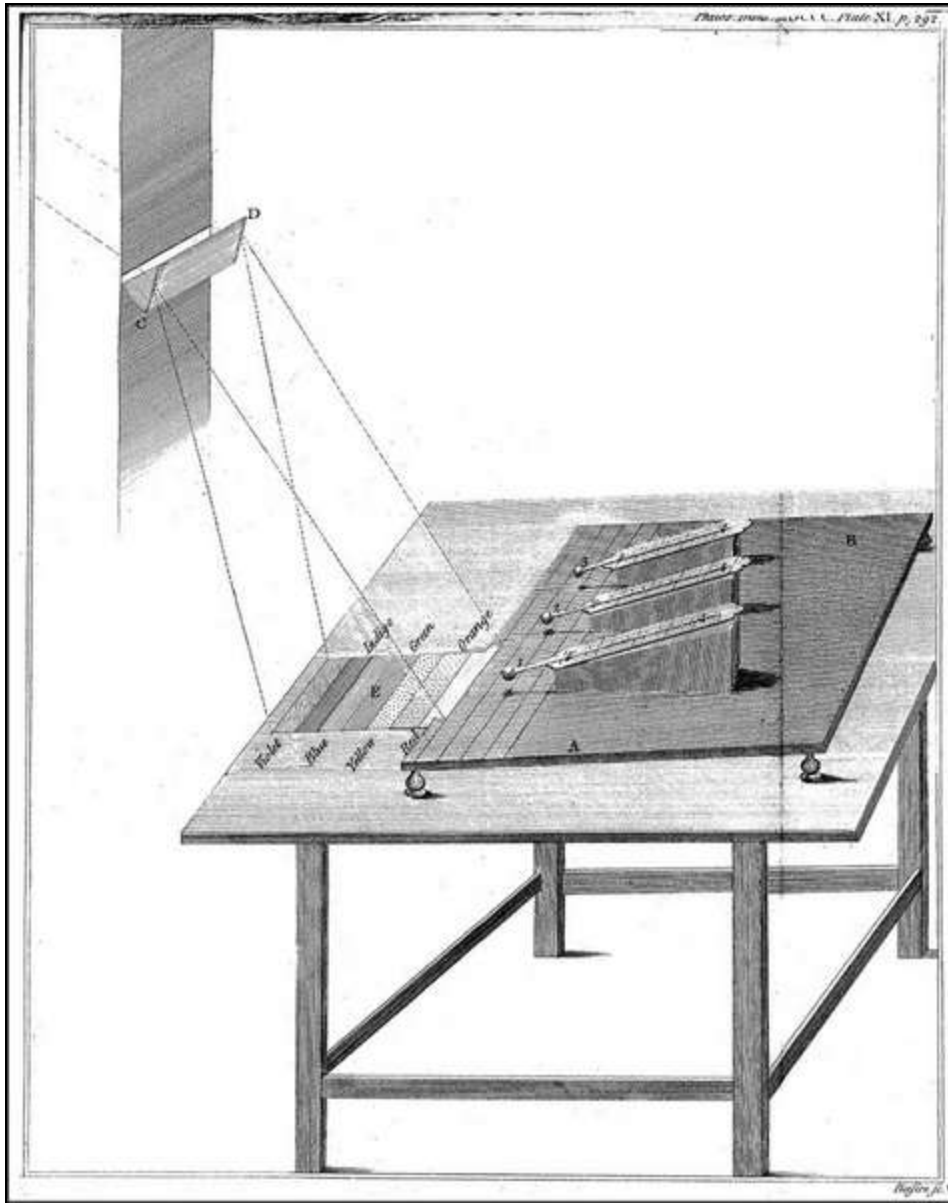
Figura 4.1 L'apparato di William Herschel per stabilire il potere termico dei raggi visibili e invisibili. L'illustrazione è tratta dal suo articolo "Experiments on the Refrangibility of the Invisible Rays of the Sun" (1800).

Mise alla prova quest'ultima ipotesi in un articolo successivo del 1800, "Experiments on the Refrangibility of the Invisible Rays of the Sun": anziché collocare i termometri dove cadevano i colori visibili della luce solare, li collocò subito all'esterno dell'estremità del rosso, così scoprì che la temperatura dei termometri aumentava ancora di più.

Herschel aveva scoperto quella che oggi chiamiamo radiazione infrarossa, che non è percepibile dall'occhio umano ma è straordinariamente efficace nel trasmettere calore. Cominciò a parlare di "raggi calorici" e inizialmente ipotizzò, correttamente, che illuminazione e calore, in tutto lo spettro della luce, visibile e invisibile, fossero due aspetti dello stesso fenomeno: "Per concludere, se chiamiamo *luce* quei raggi che illuminano gli oggetti e *calore radiante* quelli che riscaldano i corpi, ci possiamo chiedere se la luce sia essenzialmente diversa dal calore radiante. In risposta vorrei suggerire che non ci è permesso, dalle regole della filosofia, ammettere due cause diverse per spiegare determinati effetti, se possono essere spiegati da una sola"[5]. Herschel non era un fisico di formazione, e sembra che abbia abbandonato questa conclusione nelle sue opere successive, e abbia deciso che calore e luce erano cose diverse. La sua ipotesi originaria, però, sarebbe stata rivalutata a pieno. Il motivo per cui certi raggi dello spettro producono molta illuminazione e poco calore, e viceversa, alla fine sarebbe stato spiegato grazie a una migliore comprensione di come la luce interagisce con la materia, come vedremo.

Herschel sospettava che ci fossero raggi invisibili anche oltre l'estremità violetta dello spettro e, con i suoi esperimenti, cercò, senza successo, raggi con forti capacità di riscaldamento anche in quell'intervallo. Il suo lavoro però spinse lo scienziato e filosofo tedesco Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) a continuare la sua ricerca,

e Ritter riuscì a trovare le prove dell'esistenza di un'ulteriore luce invisibile a cui poi sarebbe stato dato il nome di luce ultravioletta.

Ritter, scienziato autodidatta, era un esponente del movimento tedesco della Naturphilosophie ("filosofia della natura"), nato verso la fine del XVIII secolo. Ponendo l'accento più sull'intuizione che sulla sperimentazione per spiegare i grandi problemi della scienza, la Naturphilosophie era una reazione all'empirismo scientifico del secolo precedente: la "intuizione" considerava la natura un tutto unico, dalle leggi elementari fino agli organismi viventi e al funzionamento della mente umana. L'idea che la speculazione fosse superiore all'esperimento cadde giustificabilmente in discredito alla metà del XIX secolo, ma ironicamente avrebbe stimolato nel frattempo un numero sorprendente di tentativi sperimentali coronati dal successo. Si può vedere ancora l'influsso di quel movimento, in una certa misura, nei tentativi moderni di creare teorie unificate della fisica, in cui tutti i fenomeni osservati siano spiegabili con un'unica forza fondamentale.

La Naturphilosophie evidenziava anche il concetto di polarità nella natura: come esistono cariche elettriche positive e negative e poli magnetici positivi e negativi, con un po' di immaginazione si potrebbe vedere una polarità in tutto. Le molecole d'acqua, che sono necessarie per la vita, sono formate da due elementi molto diversi: ossigeno e idrogeno. Anche l'aria che respiriamo, e che è altrettanto indispensabile per la vita, è un miscuglio di ossigeno e azoto, gas con caratteristiche molto differenti.

Da questo si può capire che cosa abbia spinto Ritter a cercare una radiazione invisibile oltre l'estremità violetta dello spettro. Se esistono raggi calorici che portano calore, oltre l'estremità rossa dello spettro, perché non dovrebbero esistere dei raggi complementari oltre l'estremità violetta? Ritter, in particolare, immaginava che oltre il violetto potessero trovarsi raggi raffreddanti, a controbilanciare i raggi

riscaldanti oltre l’estremità rossa. Il suo ragionamento, e le congetture della Naturphilosophie, si sarebbero dimostrati sbagliati, ma lo hanno comunque portato a una scoperta rivoluzionaria.

Non riuscendo a trovare i raggi raffreddanti che aveva previsto. Ritter cercò altri fenomeni basati sulla luce che potessero diventare più intensi oltre il violetto. All’epoca era noto che alcuni processi chimici sono influenzati o innescati dalla luce, perciò Ritter studiò gli effetti di colori diversi della luce sui processi chimici. In particolare, si sapeva che il cloruro d’argento esposto alla luce solare cambiava colore, da bianco a nero; Ritter espose perciò del cloruro d’argento nello spazio oltre l’estremità violetta dello spettro, dove non era presente luce visibile, e scoprì che la sostanza cambiava ancora colore, e anche più rapidamente di quanto facesse alla luce visibile. Come il calore era massimo nella porzione infrarossa dello spettro, i processi chimici avvenivano più rapidamente all’estremità ultravioletta dello spettro. Ritter aveva dimostrato l’esistenza di un altro insieme di raggi invisibili, che chiamava “raggi attinici”.

Oggi l’esistenza di luce infrarossa e ultravioletta è comunemente nota. La radiazione infrarossa è emessa da tutti i corpi caldi e può essere misurata con termocamere a infrarossi. L’attuale riscaldamento globale è dovuto alla cattura della radiazione infrarossa da parte dei gas serra nell’atmosfera: la luce visibile proveniente dal Sole attraversa liberamente l’atmosfera, viene assorbita dalla Terra e trasformata in calore; la Terra riscaldata emette radiazione infrarossa, che non può tornare nello spazio a causa della presenza di anidride carbonica e altri gas che fungono da barriera. La radiazione ultravioletta provoca scottature, e ce ne proteggiamo con le creme solari quando andiamo su una spiaggia.

Per arrivare a una migliore comprensione di come i raggi invisibili si inserissero nel quadro più generale della fisica sarebbero stati

necessari molti anni. Nel breve termine, però, la loro scoperta fece capire l’esistenza di un mondo di fenomeni nascosti, mai immaginati in precedenza. Se esistono forme di luce che non si possono vedere, perché non dovrebbero esistere anche forme di materia invisibili?

Gli autori di fantascienza e di racconti dell’orrore sono stati, ancora una volta, i primi a pensare a come la nuova fisica si potesse utilizzare per ottenere o spiegare l’invisibilità. Il primo a utilizzare in tal modo i raggi invisibili fu Ambrose Bierce (1842-1914), scrittore, giornalista, soldato e autore satirico. Nato in Ohio e cresciuto in Indiana, di famiglia povera, coltivò l’amore per la lettura e la scrittura grazie ai genitori, amanti della letteratura. A quindici anni se ne andò di casa e divenne apprendista stampatore presso un piccolo quotidiano abolizionista. Quando scoppiò la Guerra civile, Bierce si arruolò nel Nono reggimento della Cavalleria dell’Indiana nell’esercito unionista e partecipò a vari scontri, fra cui la sanguinosa battaglia di Shiloh nell’aprile 1862, dove i caduti, fra entrambe le parti, furono oltre diecimila. Le sue esperienze avrebbero ispirato e dato forma a molti dei suoi racconti di guerra e a una biografia.

Ferito alla testa durante la battaglia di Kennesaw Mountain nel giugno 1864, Bierce lasciò l’esercito. Vi rientrò brevemente nel 1866, quando fece parte di una spedizione inviata a ispezionare le basi militari a Ovest. Finì a San Francisco, dove iniziò una carriera nel campo del giornalismo, che proseguì per la maggior parte della vita.

Il periodo più famoso nella carriera giornalistica di Bierce, che ci dà anche una indicazione della sua personalità, fu nel 1896. Le società ferroviarie Union Pacific e Central Pacific avevano ricevuto un prestito enorme (130 milioni di dollari, circa 4 miliardi di dollari di oggi) a basso interesse per costruire la ferrovia e Collis Potter Huntington, dirigente della Central Pacific, si recò a Washington per cercare di convincere il Congresso a condonare i 75 milioni di debito rimanenti,

sostanzialmente trasformando il prestito in un regalo. William Randolph Hearst, proprietario del *San Francisco Examiner*, era contrario a questa soluzione e inviò Bierce a Washington per attirare l'attenzione su quel tentativo e in generale per rendere un inferno la vita di Huntington. Lo *Examiner* annunciò l'incarico di Bierce con estrema fiducia: "Il signor Bierce è il più agguerrito oppositore del monopolio delle ferrovie che ci sia mai stato in California e siamo fiduciosi che, non importa se vinceremo o perderemo al Congresso, potrà dare al signor Huntington e ai membri del Congresso che militano nel suo campo una dose generosa di ciò che si meritano"[6]. Questa affermazione si è dimostrata accurata. Gli articoli di Bierce gettarono luce su uno schema che Huntington sperava passasse inosservato e Bierce raccontò le sedute del Congresso con arguzia tanto feroce da mettere in difficoltà non solo Huntington ma anche i suoi complici fra i membri del Congresso. Il tentativo di far condonare il debito delle ferrovie fallì e Bierce fu considerato un eroe.

Si dice che Bierce avesse avuto sentore in anticipo che Huntington avrebbe cercato di corromperlo perché passasse la cosa sotto silenzio. A quanto è stato riferito, Bierce rispose ai suoi emissari: "Per favore, tornate e ditegli che il mio prezzo è di circa settantacinque milioni di dollari [era il debito ancora da estinguere]. Se, quando fosse pronto a pagare, non dovessi essere in città, può consegnare il denaro al mio amico, il ministro del Tesoro degli Stati Uniti".[7]

Nel corso della sua carriera Bierce scrisse 249 racconti, molti dei più famosi pubblicati negli anni Ottanta e Novanta dell'Ottocento, fra cui "An Occurrence at Owl Creek Bridge" (storia di guerra surreale che ha come protagonista una spia catturata, alla vigilia dell'esecuzione) e "An Inhabitant of Carcosa" (un racconto del soprannaturale, di perdita e disperazione).

L'invisibilità è presente nel racconto "La cosa maledetta", pubblicato nel 1893 e citato all'inizio di questo capitolo. Nel racconto, diviso in quattro parti, viene aperta un'inchiesta sulla morte brutale e misteriosa del cacciatore Hugh Morgan, ucciso davanti agli occhi di un testimone, anche se non era visibile alcun assalitore. La possibile spiegazione del mistero arriva nella quarta parte del racconto, estratta dal diario dello stesso Hugh, in cui descrive i suoi incontri con un essere soprannaturale che indica solo come "the Damned Thing" ("la Cosa Maledetta").

> I marinai sanno che un banco di balene che si crogiolano o giocano sulla superficie dell'oceano, a chilometri di distanza l'una dall'altra, divise dalla convessità della terra, a volte si tuffano nello stesso istante eclissandosi di colpo alla vita. Il segnale emesso è troppo grave per l'orecchio del marinaio sulla testa d'albero e per i suoi compagni sul ponte che, comunque, avvertono le sue vibrazioni sulla nave come le pietre di una cattedrale vengono scosse dal basso di un organo.
> Quel che vale per i suoni, vale anche per i colori. Alle due estremità dello spettro solare i chimici possono scorgere la presenza di quelli che sono noti come raggi "attinici". Essi rappresentano dei colori – colori integrali per quel che riguarda la composizione della luce – che noi non siamo in grado di distinguere. L'occhio umano è uno strumento imperfetto; il suo campo visivo comprende solo poche ottave di tutta la "scala cromatica". Non sono pazzo: ci sono colori che non possiamo vedere.
> E, che Dio mi assista, la Cosa Maledetta è di quel colore![8]

Bierce immagina che si sia evoluto un essere fatto di una sostanza il cui colore è al di fuori dello spettro visibile; come si possono immaginare oggetti di colore rosso o blu o verde, la Cosa Maledetta è evidentemente di un colore infrarosso o ultravioletto.

Ai tempi di Bierce gli scienziati non sapevano abbastanza dell'interazione fra luce e materia per escludere completamente questa idea, anche se la situazione sarebbe cambiata nel giro di pochi anni.

Ambrose Bierce avrebbe realizzato un atto di sparizione di diverso genere nella sua stessa vita. Nel 1913, quando aveva 71 anni, si recò in Messico per seguire la Rivoluzione messicana. A Ciudad Juárez si accodò all'esercito del generale rivoluzionario Pancho Villa come

osservatore e accompagnò i soldati fino alla città di Chihuahua, da dove inviò un'ultima lettera a un amico. Dopodiché… di lui non si seppe più nulla. Non è mai stato scoperto alcun indizio sulla sorte che gli è toccata.

Sul racconto di Bierce di un mostro invisibile probabilmente aveva influito un racconto precedente di uno dei suoi contemporanei, lo scrittore francese Guy de Maupassant (1850-1893), prolifico maestro delle forme narrative brevi: "L'Horla", pubblicato per la prima volta nel 1886 e ampliato fino ad assumere la forma finale nel 1887, è uno dei suoi racconti più famosi[9].

Il racconto è presentato come il diario di un narratore senza nome che, nonostante conduca una vita comoda e felice a Parigi, inizia a sospettare di essere sotto l'influsso psichico di un essere invisibile che chiama Horla (Figura 4.2). Quando cerca di razionalizzare l'esistenza del suo tormentatore invisibile, il narratore ricorda le parole di un monaco con cui ha conversato: "Ma vediamo noi forse la centomillesima parte di ciò che esiste? Pensate al vento, per esempio, la più grande forza della natura; che rovescia gli uomini, abbatte gli edifici, sradica gli alberi, ingrossa il mare in montagne d'acqua, distrugge le rocce e schianta sugli sui frangenti grandi bastimenti; il vento che uccide, che sibila, che geme, che mugghia – l'avete mai visto, o potete vederlo? Eppure esiste"[10]. Maupassant non parla dei colori invisibili della luce, ma vi allude quando cita le cose che non si possono vedere nella natura. L'Horla poi non è un essere soprannaturale: mangia e beve i cibi e le bevande del narratore quando questi è addormentato. Si può vedere come Bierce possa avere tratto ispirazione dal racconto di Maupassant e abbia scritto la propria versione con una spiegazione più scientifica.

L'Horla è un racconto con toni chiaramente apocalittici. Il narratore considera quella creatura lo stadio successivo dell'evoluzione, un

essere superiore all'umanità, che ne prenderà il posto. Più avanti nel racconto, il narratore viene a sapere che una apparente follia ha sconvolto Rio de Janeiro, dove gli abitanti fuggono dalle loro case per paura di invasori invisibili. Poi ricorda di avere salutato sventolando la mano una nave brasiliana, che passava vicino alla sua casa, all'inizio del diario, e si rende conto di avere accolto il mostro senza volerlo nella sua abitazione. Alla fine, prende misure drastiche per intrappolare e distruggere la creatura, prima che sconvolga del tutto la sua mente.

Figura 4.2 L'Horla tormenta la sua vittima. Illustrazione da un'edizione delle opere di Guy de Maupassant del 1911.

Guy de Maupassant ebbe problemi psicologici notevoli nell'ultima parte della sua vita: soffriva di paranoia e di una fobia della morte. Si è ipotizzato che "L'Horla" rispecchi i suoi stessi tormenti. Fu ricoverato nel 1892 e morì l'anno successivo; la notizia della sua morte fece il giro del mondo e l'ambiente letterario pianse la perdita di uno dei suoi rappresentanti. Émile Zola, romanziere e suo amico, in occasione della

sua sepoltura, fece alcune osservazioni che riassumevano le complessità della sua vita: “Al di là della sua fama come scrittore, rimarrà come uno degli uomini che sono stati più fortunati e più sfortunati fra quanti hanno vissuto, l’uomo in cui sentiamo la speranza e la disperazione dell’umanità, il fratello adorato, rovinato, che scompare fra le lacrime”[11].

---

1 Southey, *Doctor.*

2 Smith, *Harmonics;* Smith, *Compleat System of Opticks*.

3 Herschel, “XIII. Investigation of the Powers of the Prismatic Colours to Heat and Illuminate Objects; with Remarks, that Prove the Different Refrangibility of Radiant Heat. To Which Is Added an Inquiry into the Method of Viewing the Sun Advantageously, with Telescopes of Large Apertures and High Magnifying Powers”. Herschel era un grande scienziato, ma non aveva il dono della concisione.

4 *Ibidem*.

5 Herschel, “XIV. Experiments on Refrangibility”.

6 *San Francisco Examiner,* 21 gennaio 1896.

7 Starrett, *Ambrose Bierce*, p. 22.

8 Bierce, *Damned Thing*, p. 23-24 [trad. it. pp. 129-130].

9 La prima versione fu pubblicata su *Gil Blas* il 26 ottobre 1886; la versione rivista fu pubblicata dall’editore Paul Ollendorff nel 1887.

10 Maupassant, *Works of Guy de Maupassant*, pp. 8-9 [trad. it. p. 163].

11 “Zola’s Eulogy”, *St. Louis Post Dispatch*, 30 luglio 1893.

Capitolo 5

La luce esce dall’oscurità

> Completamente invisibile, viaggiando alla velocità di molti chilometri al secondo, la sua astronave si diresse su Marte. Dovette attraversare campi minati, ma ormai la cosa non aveva più importanza. I raggi ad alta potenza disintegratrice, che emanavano dalla superficie esterna della sua macchina, distruggevano le mine prima che potessero esplodere, e nello stesso tempo cancellavano qualsiasi onda luminosa che avrebbe potuto segnalare la sua presenza agli occhi che la spiavano, nascosti dal fulgore del Sole.
> – A.E. van Vogt, *Slan* (1946) [trad. it. pp. 221-222]

Agli inizi del XIX secolo, la comprensione che l’umanità aveva della natura della luce ha subito una trasformazione drastica, che avrebbe eclissato perfino la scoperta dei raggi di luce invisibili. Per quasi cento anni, lo studio dell’ottica era stato dominato dalle idee di Isaac Newton, che aveva pubblicato la sua opera classica sull’argomento, *Opticks*, nel 1704. Il lavoro di Newton sembrava mettere il punto fermo a un dibattito che aveva infiammato la sua epoca: la luce è un flusso di minuscole particole o un’onda, come l’acqua e il suono? Newton condusse esperimenti rigorosi, sondando le proprietà della luce in ogni modo immaginabile a quel tempo e ne concluse che la luce è costituita da un flusso di particelle.

Esistevano però ancora alcuni strani fenomeni, che la teoria di Newton non riusciva a spiegare. Nel 1665, per esempio, il gesuita italiano Francesco Grimaldi aveva notato che un sottile fascio di luce sembrava disperdersi dopo avere attraversato una sottile fessura in uno schermo opaco. Aveva chiamato quel fenomeno *diffrazione*, dal latino

diffringere, “rompere in pezzi”. Gli scienziati non ritenevano che la diffrazione fosse un problema grave per la teoria newtoniana: pensavano fosse un rompicapo secondario che alla fine sarebbe stato risolto utilizzando il sistema di Newton.

Nel 1800, però, lo scienziato inglese Thomas Young pubblicò il primo di una serie di articoli in cui sosteneva che la luce ha, in realtà, proprietà simili a quelle delle onde, e le sue ricerche avrebbero dato inizio a una nuova epoca di ottica ondulatoria, che continua ancora oggi.

Nato nel 1773 in Inghilterra, nel villaggio di Milverton nel Somerset, Thomas Young si distinse già da ragazzo. Sapeva leggere correntemente a due anni, a quattro aveva letto la Bibbia due volte. Dimostrava una capacità di apprendimento incredibile per le lingue, e da adolescente aveva tradotto parti della Bibbia in tredici lingue diverse. A quattordici anni, assunse addirittura il ruolo di tutore per un amico di famiglia[1].

Le lingue non erano la sua unica passione, però. Leggeva molto, anche libri sulla filosofia naturale e divenne “particolarmente deliziato” dello studio e della pratica dell’ottica[2]. Da adolescente, con l’aiuto di un tecnico della sua scuola, imparò a progettare e costruire telescopi.

Nonostante i suoi interessi molto vari, inizialmente Young si concentrò su una carriera come medico, sull’esempio di un prozio, Richard Brocklesby, medico di grande fama a Londra. Brocklesby lo aveva curato quando si era ammalato gravemente da adolescente e gli aveva salvato la vita. Young però era motivato più che dalla gratitudine: seguendo la carriera medica, avrebbe avuto diritto all’eredità di uno zio, con la conseguente sicurezza finanziaria. Così, nel 1793, divenne studente al venerabile Ospedale di San Bartolomeo a Londra, che era stato fondato nel 1123[3].

Anche nel campo della medicina, Young era continuamente attirato da interrogativi di ottica. Nello studio dell'anatomia, aveva saputo di un problema aperto relativamente alla vista: in che modo l'occhio di una creatura vivente si adatta (si accomoda) per produrre immagini chiare degli oggetti a qualsiasi distanza? Dissezionando l'occhio di un toro, giunse alla conclusione che la forma del cristallino si distorce sotto l'azione dei muscoli e modifica, di conseguenza, le proprie proprietà di lente. Young scrisse un articolo sull'argomento e lo presentò alla prestigiosa Royal Society a Londra il 30 maggio 1793. L'articolo inizialmente fu accolto con tanto favore che Young fu fatto Fellow della Royal Society l'anno seguente, a ventuno anni d'età.

Il suo articolo, "Observations on Vision", però, incontrò subito controversie e censure.[4] I suoi avversari sostenevano che i suoi risultati non erano corretti perché non avevano osservato alcuna deformazione della lente dell'occhio nelle loro ricerche. A peggiorare la situazione, un famoso chirurgo, John Hunter, sostenne che Young lo aveva sentito parlare dell'occhio e aveva copiato le sue idee sull'argomento. L'accusa di plagio fu liquidata rapidamente, ma Young finì per rinunciare al suo lavoro sull'occhio umano per un po' di tempo, lasciando la parola agli esperti del campo. La ritrattazione gli provocò ulteriori guai in seguito, anche se da allora la scienza ha mostrato che la sua spiegazione dell'accomodazione era corretta.

Nell'ambito del suo programma per un'istruzione medica completa, Young continuò i suoi studi a Edimburgo e da lì andò poi a Göttingen per ottenere una laurea. Non vi rimase a lungo, però: lui e suo zio avevano frainteso le regole per l'esercizio della medicina a Londra, che imponevano due anni di residenza in una facoltà medica londinese per diventare Fellow del Royal College of Physicians. Quando lo scoprì, Young si affrettò a completare la laurea a Göttingen e finì per rimanervi solo nove mesi.

Per ottemperare a tutti i requisiti di laurea, dovette tenere una conferenza legata alla medicina e scelse come tema il funzionamento della voce umana. Questo lo costrinse a studiare le proprietà delle onde sonore e, nel corso delle sue indagini, fu colpito dalla somiglianza fra i fenomeni relativi al suono e quelli relativi alla luce. Anche se gli scienziati da tempo avevano concluso che la luce non possiede proprietà ondulatorie, le somiglianze fra luce e suono sembravano troppo significative per essere pure coincidenze, e indussero Young a esplorare la possibilità che la luce fosse in realtà un'onda.

Dopo Göttingen, Young entrò nell'Emmanuel College, a Cambridge, per l'ultima fase della sua formazione, e completò gli studi due anni dopo, nell'autunno del 1799. Poi si dedicò alla pratica medica privata a Londra, secondo i piani, ma quell'attività prendeva piede molto lentamente (non era facile trovare pazienti a quel tempo) e gli lasciava molto tempo libero per riflettere sugli interrogativi scientifici che lo avevano interessato nel corso degli anni.

Iniziò con una serie di articoli su vari argomenti scientifici, fra cui le proprietà delle onde sonore, che furono pubblicati su *British Magazine* sotto lo pseudonimo "The Leptologist". Essendosi trovato in difficoltà in passato quando aveva condiviso le sue idee scientifiche, sembra abbia utilizzato quello pseudonimo per poter intervenire nei dibattiti senza rischiare di perdere la propria reputazione. Rientrò ufficialmente nel dibattito scientifico con una lettera che fu pubblicata dalla Royal Society nel gennaio 1800, "Outlines of Experiments and Inquiries respecting Sound and Light"[5]. La lettera è principalmente un'analisi delle onde sonore e del loro comportamento, ma Young notò anche le somiglianze fra suono e luce, un indizio delle sue ricerche future. Più avanti nel corso dello stesso anno, Young pubblico sulle *Philosophical Transactions of the Royal Society* "On the Mechanism of the Eye", una difesa delle sue ipotesi sulle proprietà del cristallino dell'occhio[6].

Per proseguire la sua rinnovata attività scientifica, Young accettò nel 1801 un incarico come professore di filosofia naturale alla Royal Institution, un'organizzazione fondata solo due anni prima per favorire l'istruzione e la ricerca scientifica. In questo nuovo ruolo, concentrò le energie sullo studio delle proprietà del suono e sulle loro notevoli somiglianze con quelle della luce. Per capire che cosa vide Young, dobbiamo dedicare un po' di tempo ad analizzare che cosa sia effettivamente un'onda. In termini tecnici, possiamo descrivere un'onda come un moto oscillatorio di "qualcosa" che trasporta energia da un luogo all'altro ma non trasporta quel "qualcosa" stesso. Le onde nell'acqua sono l'esempio più semplice da visualizzare, perché si spostano abbastanza lentamente da poter essere viste a occhio nudo e possiedono anche tutte le proprietà delle altre onde, come quelle acustiche e quelle luminose.

Quando si getta un sasso in uno stagno, le increspature si diffondono dal punto d'impatto, di solito manifestandosi come una successione di regioni più alte e più basse, in cui il livello dell'acqua è rispettivamente maggiore o minore del normale. Queste increspature possono percorrere grandi distanze sulla superficie dell'acqua prima di dissiparsi e possono disturbare gli oggetti che si trovano sulla superficie dell'acqua, come foglie (o uccelli acquatici). Questa capacità di spostare oggetti distanti dimostra che le onde trasportano energia. Non esiste un flusso netto di acqua che si allontana dal punto in cui il sasso è sceso: il livello dell'acqua (il "qualcosa" per le onde d'acqua) localmente aumenta o diminuisce, ma l'acqua stessa non si sposta dal punto di impatto. Questo comportamento è diverso dal movimento dell'acqua in un fiume, che scorre effettivamente a valle in massa e alla fine si scarica in un lago o nell'oceano.

Un altro esempio di onda è la vibrazione di un pezzo teso di corda o di elastico, come una corda di una chitarra (o un giocattolo a molla).

Quando la corda della chitarra viene pizzicata, la sollecitazione si propaga per tutta la lunghezza della corda. Le onde portano energia lungo la corda, ma la corda stessa rimane nello stesso posto, ben fissata alla chitarra.

La forma più semplice di onda è quella che consiste di un semplice movimento su e giù ripetuto, che matematicamente assume la forma di un'onda sinusoidale (Figura 5.1). Nell'ottica, per motivi che saranno presto chiari, queste sono chiamate onde monocromatiche (cioè, di un solo colore).
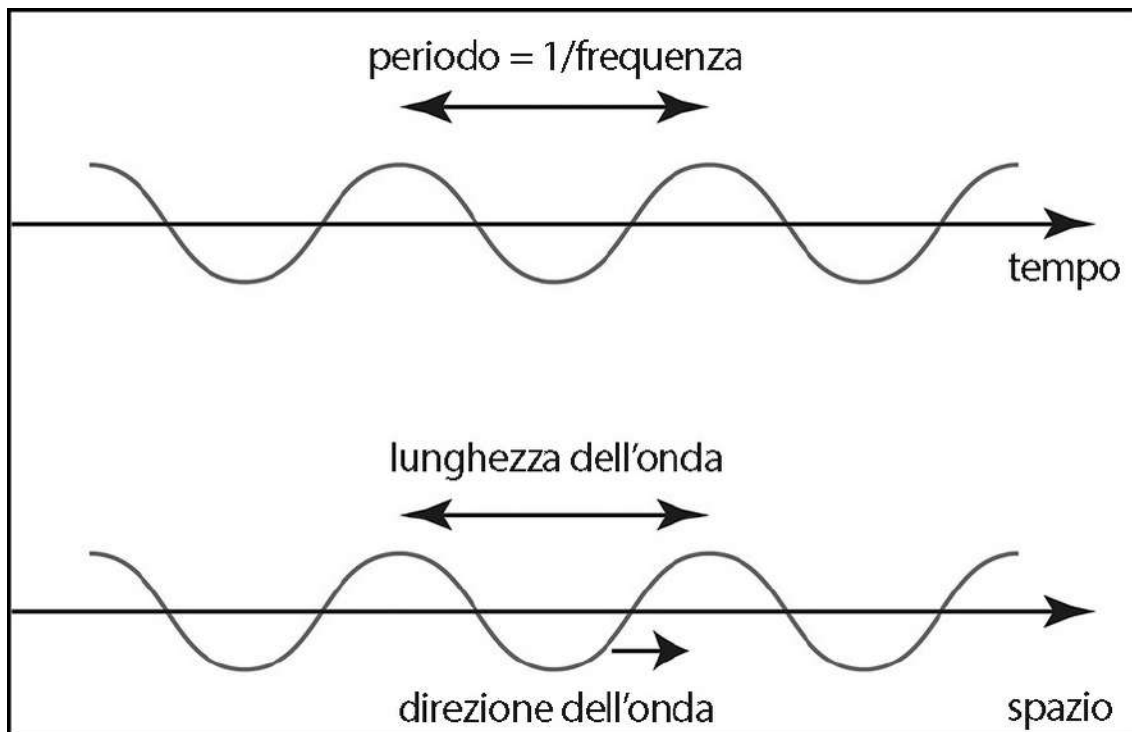
Figura 5.1 Onde monocromatiche su una corda.

Se osserviamo un singolo punto sulla corda per capire che cosa fa al passare del tempo, vediamo che l'onda lo fa muovere alternativamente verso l'alto e verso il basso. È un po' come stare seduti su una barca e sentirla salire e scendere al passaggio delle onde. L'intervallo temporale fra due picchi è il periodo dell'onda e il suo inverso è la frequenza, che ci dice quanti picchi si incontrano ogni secondo.

Se prendiamo un'istantanea di tutta la corda in un momento ben preciso, vediamo un'immagine simile: seguendo la sua lunghezza, si notano ondulazioni alternative verso l'alto e verso il basso. La distanza fra i picchi è la lunghezza dell'onda: rappresenta la lunghezza fisica di un singolo ciclo su e giù dell'onda.

Per le onde sonore, il "qualcosa" che varia in modo ondulatorio è la densità delle molecole dell'aria. Le regioni alternativamente di alta e bassa densità viaggiano nell'aria e provocano le vibrazioni dei nostri timpani, che percepiamo come suono. Questo movimento è diverso dal trasporto di molecole d'aria nello spazio, che percepiamo come vento o come brezza. In ambito musicale, il Do centrale ha una frequenza di 261 cicli al secondo, che corrisponde a una lunghezza d'onda di 132 centimetri. Le note più acute hanno frequenze più elevate e lunghezze d'onda proporzionalmente più brevi.

Una particolare proprietà delle onde sonore attirò l'attenzione di Young: il fenomeno noto oggi come risonanza. Quando si crea un suono in uno spazio chiuso, le onde la cui lunghezza d'onda è contenuta precisamente in quello spazio si rafforzeranno e il suono diventerà più forte. Se avete avuto mai l'impressione di cantare meglio nella doccia, avete sperimentato la risonanza delle onde sonore: le pareti della doccia formano uno spazio chiuso che rafforza particolari toni. Un'onda risonante non si sposta realmente, ma oscilla nel suo spazio delimitato: è quella che si definisce un'onda stazionaria.

Un esempio semplice di risonanza si trova nel funzionamento degli organi a canne. Una canna con aperture a entrambe le estremità contiene esattamente onde che hanno un massimo o un minimo a ciascuna estremità. Questo significa che il suono più basso che una canna produce avrà una semilunghezza d'onda esattamente uguale alla lunghezza della canna (Figura 5.2). Un'onda di quella lunghezza si rafforzerà rapidamente, producendo un tono forte e chiaro. Nella canna

risuoneranno anche onde di lunghezza minore, purché, a loro volta, siano tali da avere un massimo o un minimo a ciascuna estremità. Questo significa che nella canna possono risuonare molte lunghezze d'onda diverse: la più lunga possibile è chiamata fondamentale, le più corte sono le armoniche. La frequenza fondamentale di solito è quella più forte e definisce l'altezza caratteristica della nota. La combinazione della fondamentale e delle armoniche è ciò che dà a uno strumento musicale il suo timbro caratteristico.
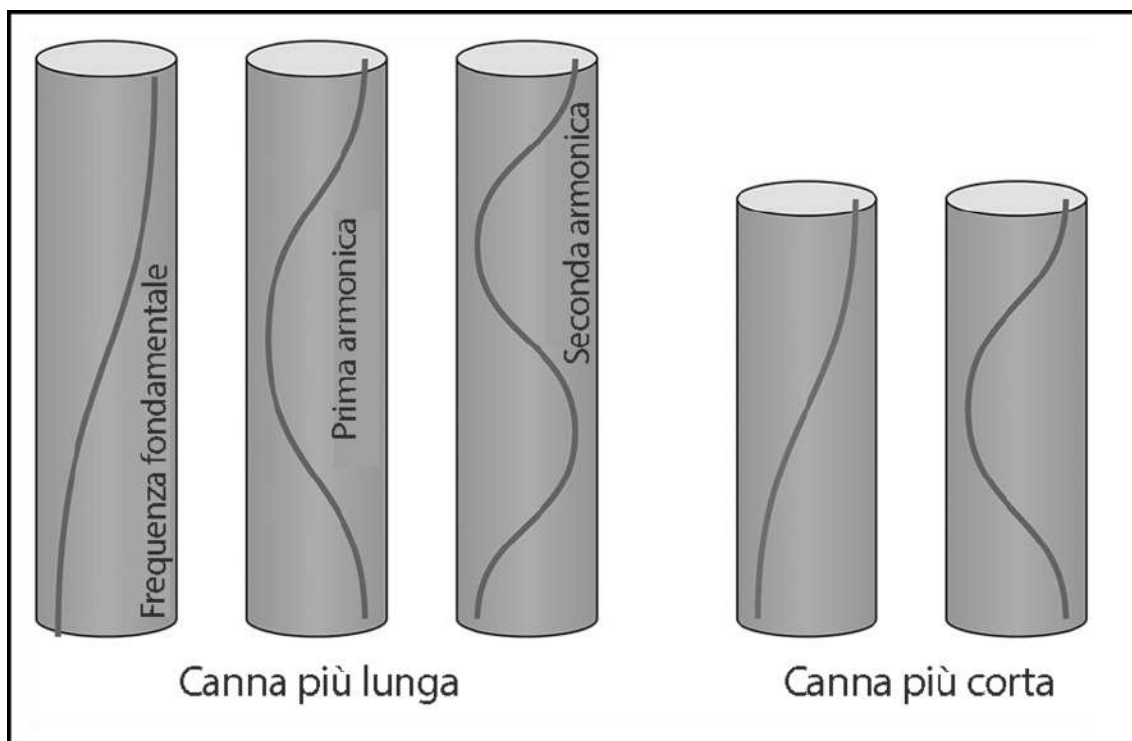
Figura 5.2 Onde risonanti in una canna d'organo, per canne più lunghe e più corte.

La risonanza è alla base del funzionamento della maggior parte degli strumenti a fiato: i musicisti che suonano un flauto, per esempio, cambiano la nota che eseguono, aprendo o chiudendo fori nello strumento, trasformandolo a tutti gli effetti in un tubo cavo più breve o più lungo. Gli ottoni, come la tromba e la tuba, usano valvole per reindirizzare il suono su percorsi più o meno lunghi, facendo variare di conseguenza la frequenza di risonanza.

Nel comportamento risonante delle canne d’organo, Young vide una spiegazione di un fenomeno analizzato dettagliatamente da Isaac Newton nella sua *Opticks* e che poi sarebbe stato noto con il suo nome: gli anelli di Newton. Newton mise una lente di vetro con una curvatura molto leggera sopra un pezzo di vetro piano e osservò che dal centro si producevano verso l’esterno degli anelli, molto piccoli, ma che possono essere ingranditi o osservati in un microscopio (Figura 5.3).

Newton aveva interpretato gli anelli colorati come il risultato di un processo complicato di riflessione e rifrazione della luce che rimbalza più volte nello spazio fra la lente e la piastra di vetro. Young, invece, vi vide qualcosa d’altro: se la luce è un’onda, allora lo spazio, che aumenta di altezza quanto più ci si allontana dal centro, poteva comportarsi come una sequenza di canne d’organo per la luce. I colori visti da Newton perciò avrebbero rappresentato onde luminose risonanti fra i pezzi di vetro in regioni di diversa altezza dello spazio fra di essi. Ciascun colore della luce avrebbe rappresentato un’onda di lunghezza e frequenza differenti. Se si osserva un classico organo a canne e si visualizzano piccole canne negli spazi fra lente e piastra di vetro dell’esperimento degli anelli di Newton, si può immaginare come Young sia arrivato alla sua idea (Figura 5.4).
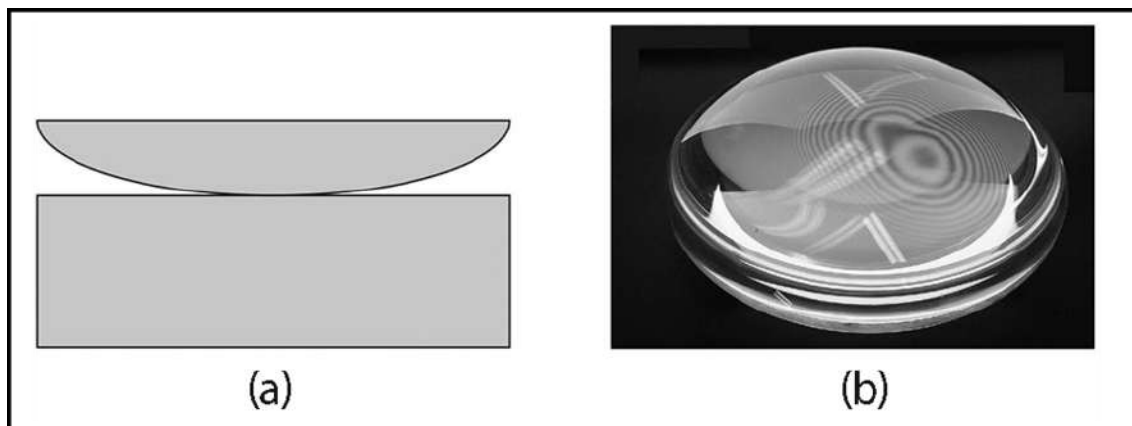
Figura 5.3 (a) Vista laterale dell’apparato sperimentale di Newton (lo spessore della lente è esagerato); (b) anelli osservati dall’alto, ingranditi dalla superficie curva

superiore. (Fotografia: Ulfbastel / Wikimedia Commons / Public Domain.)
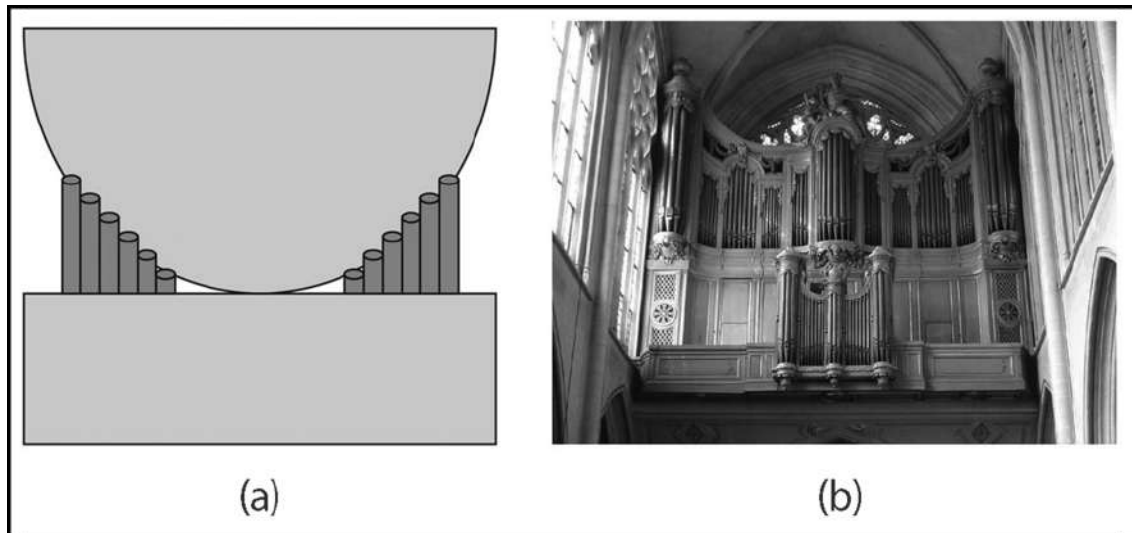
Figura 5.4 (a) L’esperimento degli anelli di Newton con canne immaginarie; (b) l’organo a canne di Saint-Germain l’Auxerrois a Parigi. (Foto: Gérard Janot / Wikimedia Commons / Public Domain.)

Young alluse per la prima volta a queste possibilità nella sua lettera “Outlines of Experiments and Inquiries respecting Sound and Light”. Nella breve sezione dedicata all’analogia fra luce e suono, mostrava la somiglianza fra gli anelli di Newton e gli organi a canne e riproponeva l’idea, formulata per la prima volta dal matematico Leonhard Euler, che i colori della luce fossero la manifestazione visibile della frequenza della luce. La luce rossa ha la lunghezza d’onda maggiore, la violetta quella minore.

Young affrontò anche un’idea sbagliata sulle onde che si era diffusa dai tempi di Newton e faceva parte dell’argomentazione di Newton contro la natura ondulatoria della luce: che, cioè, le onde, una volta generate, si diffondono ugualmente in tutte le direzioni. Newton notava che questo era vero per le onde note, come quelle che si creano lanciando un sasso in uno stagno; la luce, invece, risultava fortemente direzionale, come quando la luce del sole fa capolino in mezzo a nubi

scure, creando quelli che tecnicamente sono noti come raggi crepuscolari.

Young sosteneva che Newton semplicemente si era sbagliato: anche se le onde sonore si diffondono molto, possono essere anche molto direzionali. Ne forniva vari esempi, aggiungendovi anche un po' di humor: "È ben noto che, se una persona ne chiama un'altra con un megafono, lo punta verso il luogo in cui si trova chi viene chiamato: e un membro molto rispettabile della Royal Society mi assicura che il rombo di un cannone appare molte volte più forte a una persona verso la quale viene sparato il colpo, che a una che si trova nella direzione opposta"[7]. C'erano buoni motivi, dunque, per pensare che anche la luce potesse viaggiare senza disperdersi significativamente. Le onde luminose a quel punto non avrebbero avuto nemmeno bisogno di "canne" come quelle di un organo per produrre i colori degli anelli di Newton.

Il 12 novembre 1801, Young tenne alla Royal Society una prestigiosa Bakerian Lecture sulla teoria della luce e dei colori[8], in cui presentò una teoria molto articolata delle proprietà ondulatorie della luce. Fra i risultati a cui era arrivato, stimava la lunghezza d'onda e la frequenza dei diversi colori della luce, utilizzando le misure originali di Newton per lo spessore degli intervalli negli anelli di Newton. Per la luce rossa, per esempio, calcolava una lunghezza d'onda di 0,675 miliardesimi di metro e una frequenza di 463 milioni di milioni di oscillazioni al secondo. Per la luce blu, calcolava una lunghezza d'onda di 0,5 miliardesimi di metro e una frequenza di 729 milioni di milioni di oscillazioni al secondo. Questi valori sono molto ragionevoli anche secondo gli standard moderni, considerando che i termini "rossa" e "blu" indicano un intervallo di frequenze e di lunghezze d'onda. La frequenza elevata e la piccola lunghezza d'onda delle onde luminose inoltre spiegavano in parte perché non fossero state notate in

precedenza le proprietà ondulatorie della luce: le oscillazioni sono troppo rapide e troppo piccole perché l'occhio umano possa distinguerle, in circostanze ordinarie.

L'uso delle misure e delle osservazioni sperimentali di Newton non era solo un gesto di cortesia da parte di Young: sapeva bene che, da ultimo arrivato, criticando il lavoro di quell'uomo leggendario si sarebbe attirato forti reazioni negative. Young fece di tutto nel suo articolo per evidenziare come gli esperimenti e le ipotesi di Newton potessero essere utilizzati per dare sostegno a una teoria ondulatoria della luce: stava tentando, in sostanza, di attribuire a Newton almeno parte del merito della scoperta.

In mezzo alle molte ipotesi introdotte da Young nel suo articolo, sarebbe stato facile trascurarne una, in cui considerava quello che accade quando i percorsi delle onde si intersecano. Presentò quella che alla fine sarebbe stata chiamata legge dell'interferenza, una delle proprietà più importanti delle onde, con queste parole: "Quando due ondulazioni, di origini diverse, coincidono perfettamente o sono molto prossime per direzione, il loro effetto congiunto è una combinazione dei moti appartenenti a ciascuna"[9]. Se pensiamo alle onde nell'acqua, possiamo immaginare due onde che siano state create separatamente e che si intersecano un certo punto. Se entrambe le onde sono nella fase ascendente nello stesso momento, le loro azioni si combineranno e produrranno un'onda ancora più grande; se un'onda si sta alzando mentre l'altra si sta abbassando, le loro azioni si cancelleranno a vicenda almeno parzialmente, producendo un'onda più piccola di ciascuna delle due separatamente. Oggi nel primo caso si parla di interferenza costruttiva, nel secondo di interferenza distruttiva.

Nella Figura 5.5 si vedono due onde quadre su una corda, che si propagano una in direzione dell'altra. Se le due onde si incontrano quando entrambe sono in una fase di picco, si combinano; se si

incontrano un picco e una valle, si cancellano. Va notato che le onde non si distruggono a vicenda: entrambe, dopo essersi incontrate, proseguono per la propria strada immutate. In altre parole, “interferiscono” fra loro solo al passaggio.
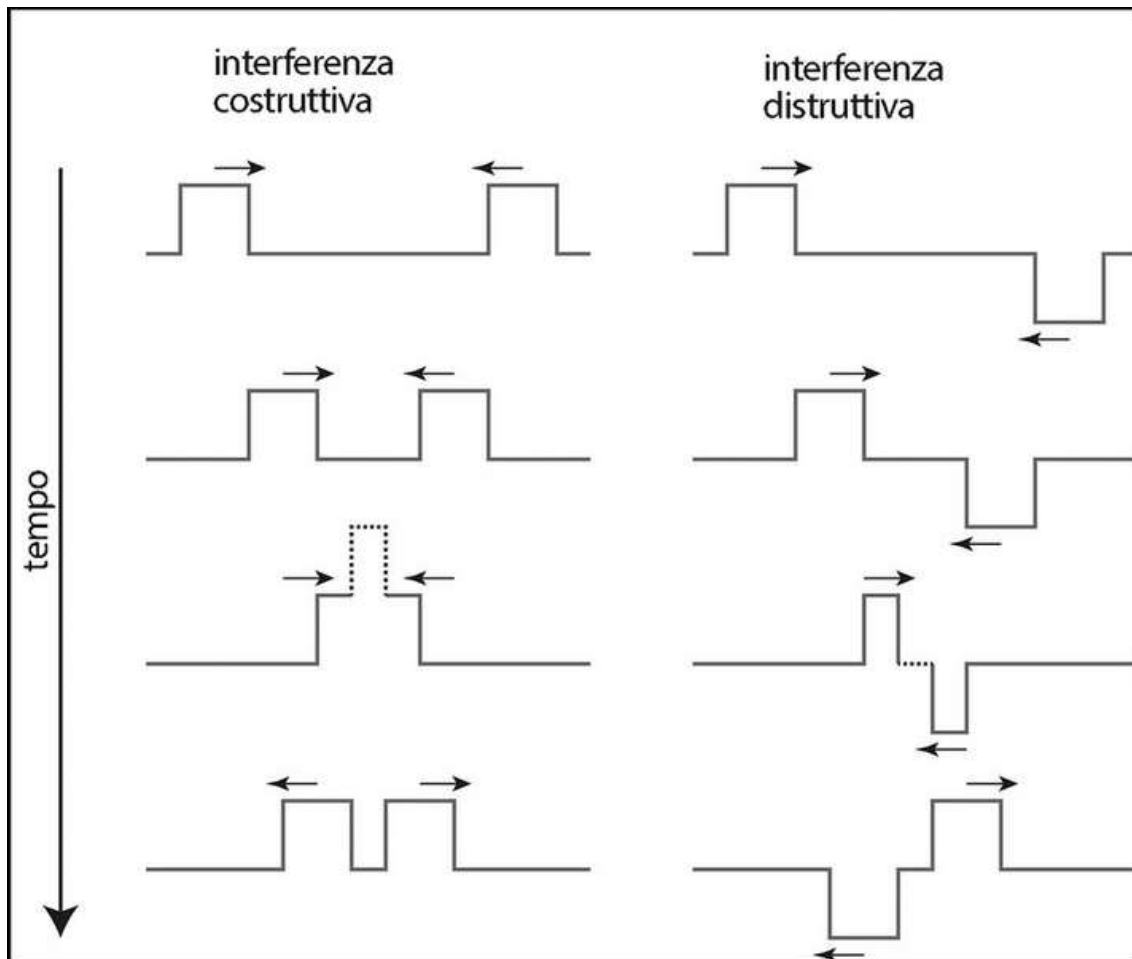
Figura 5.5 L’interferenza costruttiva o distruttiva di due onde che viaggiano in direzioni opposte. Le regioni tratteggiate indicano dove le onde si sovrappongono e interferiscono.

Young utilizzò questa legge dell’interferenza per spiegare vari sistemi ottici in cui appaiono inaspettatamente i colori, fra cui gli anelli di Newton ma anche la luce che viene diffusa da linee parallele incise su una superficie levigata (quello che oggi verrebbe chiamato un reticolo di diffrazione). Se avete mai visto l’arcobaleno di colori che si

riflette dal lato lucido di un compact disk o di un disco Blu-ray, quello è un reticolo di diffrazione: i rilievi e le incisioni che sono utilizzati per memorizzare i dati sul disco fungono da reticolo.

In un successivo contributo presentato alla Royal Society nel luglio 1802, Young presentava una nuova osservazione: bande di colore compaiono quando la luce passa intorno a una fibra sottile o a un capello[10]. Young aveva praticato un forellino in un pezzo di cartone e aveva fissato la fibra attraverso il centro del foro. Guardando una sorgente di luce distante attraverso il foro, aveva visto fasce di luce colorata da entrambi i lati della fibra, parallele a essa. Interpretava quei colori come dovuti all'interferenza fra le onde luminose che passavano dai lati opposti della fibra. Poiché colori diversi hanno lunghezze d'onda diverse, i punti nello spazio in cui si incontrano i loro "picchi" e le loro "valli" sono diversi, e danno luogo perciò a colori diversi in punti diversi.

Young continuò le sue ricerche e nel novembre 1803 presentò il suo risultato più significativo a favore dell'interferenza della luce, in una Bakerian Lecture dedicata a "esperimenti e calcoli relativi all'ottica fisica"[11]. Era la prima dimostrazione grezza di quello che poi sarebbe stato noto come esperimento della doppia fenditura di Young. Aveva praticato un piccolo foro nella persiana di una finestra per consentire il passaggio di un sottile fascio di luce solare; lungo il percorso del fascio, aveva collocato un sottile foglio di carta, dello spessore di circa 2 millimetri, per dividere il fascio in due parti, ciascuna delle quali si diffondeva anche lungo il percorso dell'altra. L'onda combinata poi veniva proiettata su uno schermo posto a una certa distanza, e così era possibile vedere molte frange colorate nell'ombra proiettata dalla carta. Quella, secondo Young, era una prova conclusiva della natura ondulatoria della luce.

Nel corso del tempo, Young perfezionò il suo esperimento: nel suo successivo libro, *A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts* (1807), la carta era stata sostituita da "due minuscoli fori o due fenditure"[12].In questa configurazione sperimentale, la luce che va a formare una figura sullo schermo di osservazione proviene solo dai forellini e di conseguenza è molto più facile vedere la figura d'interferenza. Nel libro, Young presentava una bella immagine di come le onde provenienti dai due forellini interferiscono (Figura 5.6).
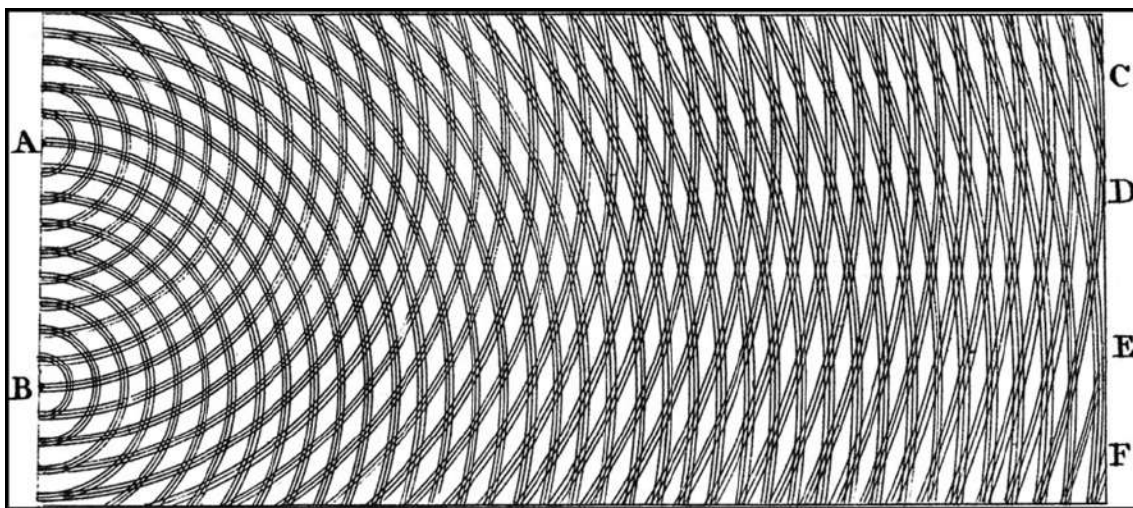
Figura 5.6 L'esperimento dell'interferenza di Young. Illustrazione tratta da "A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts" (1807).

In questa immagine, A e B rappresentano i due forellini. Le onde luminose si propagano come ondulazioni circolari dai fori e alla fine si sovrappongono. Se consideriamo le regioni bianche di ciascuna ondulazione come la parte "su" delle onde e le linee scure come la parte "giù", si può vedere che nell'immagine si formano regioni scure dove le linee scure di una sorgente incrociano le regioni bianche dell'altra. Queste sono regioni di interferenza distruttiva completa, e formano linee che terminano ai punti C, D, E, F sullo schermo di osservazione. Se si usa una sorgente costituita da un singolo colore, la figura sullo schermo è formata da una successione di linee chiare e

scure: le regioni di interferenza costruttiva e distruttiva rispettivamente.

Young compì anche un’altra osservazione significativa, di particolare interesse. Nel 1800 l’astronomo tedesco William Herschel aveva scoperto la radiazione infrarossa, radiazione calorica invisibile subito al di fuori dell’estremità rossa dello spettro visibile. L’anno successivo, il chimico Johann Wilhelm scoprì la radiazione ultravioletta, oltre l’estremità violetta dello spettro visibile, rilevabile grazie a cambiamenti chimici. Young riprodusse i propri esperimenti sugli anelli di Newton con la radiazione ultravioletta e, grazie all’uso di carta immersa in una soluzione di nitrato d’argento, che si comportava come carta fotografica, dimostrò che anche la luce ultravioletta produce interferenza. Dimostrò perciò che le proprietà ondulatorie della luce si estendono oltre una estremità dello spettro visibile e ipotizzò che lo stesso fosse vero per la luce infrarossa.

Sembra che le ricerche di Young siano state ricevute almeno con cortesia. Come abbiamo visto, gli venne chiesto di tenere tre Bakerian Lecture nell’arco di quattro anni, due sulla sua teoria della luce e una sul meccanismo dell’occhio. Questa mancanza di ostilità evidentemente non si tradusse però in una ampia accettazione delle sue idee.

Young cercò di evitare ogni controversia dando molto merito a Newton nel suo lavoro, ma le controversie non mancarono comunque, e arrivarono da una fonte inaspettata: i suoi scritti precedenti, poco accorti. In uno dei suoi articoli firmati “the Leptologist”, Young aveva criticato in modo un po’ irriverente “un giovane signore di Edimburgo” per avere scoperto cose che erano ben note da anni. Il “giovane signore” era Henry Peter Brougham, che come Young aveva iniziato a interessarsi di ottica in giovane età e aveva scritto vari articoli sull’argomento per la Royal Society (ne sarebbe diventato Fellow nel

1803). A differenza di Young, però, Brougham era un discepolo devoto di Newton e la combinazione di quelli che gli apparivano attacchi condotti da Young a lui stesso e a Newton gli risultò insopportabile. Nel 1802, Brougham fondò la rivista *Edinburgh Review* e nel 1803 dalle sue pagine lanciò anonimamente una serie di pesanti attacchi a Young.

A proposito di "Theory of Light and Colours" di Young, per esempio, Brougham iniziava il suo attacco in questo modo: "Poiché questo articolo non contiene nulla che meriti il nome di esperimento o di scoperta, e in effetti è privo di ogni genere di merito, avremmo dovuto escluderlo dalla moltitudine degli articoli che devono sempre trovare accoglienza nella raccolte di una Società che si è impegnata a pubblicare due o tre volumi ogni anno".[13] A proposito dell'articolo del 1802 in cui parlava dei colori prodotti attorno alle fibre, Brougham sembrava quasi gioioso di accusare Young di avere riscoperto fatti già noti, ribaltandogli l'accusa che aveva rivolto a lui in precedenza: "Ci spiace scoprire che il dottor Young non ha più successo nel compiere osservazioni ed esperimenti che nel costruire sistemi. Il nuovo caso di colori che afferma di avere scoperto è stato osservato mille volte; ed egli ha solo il merito di averne dato una spiegazione assurda e contraddittoria"[14]. Gli attacchi, anche se di fatto basati in gran parte su errori e fraintendimenti, ferirono decisamente l'orgoglio di Young. Rispose nel 1804 pubblicando un proprio breve pamphlet di confutazioni, *A Reply to the Animadversions of the Edinburgh Reviewers*. Sin dalle prime parole, è chiaro che la discussione fra i due è andata oltre la semplice disputa scientifica.

> Un uomo che abbia la giusta considerazione per la dignità della propria persona, anche se la sua sensibilità a volte può essere risvegliata dagli attacchi ingiusti di una malevolenza interessata, in generale riterrà più opportuno sopportare in silenzio gli effetti temporanei di un'ingiuria ricevuta, anziché lasciarsi interrompere nelle proprie iniziative per sforzarsi di respingere le invettive e di punire l'aggressore. È possibile

però che arte e malizia siano combinate tanto insidiosamente da dare alle affermazioni più grossolanamente false le sembianze della giustizia e dell'onestà.[15]

Young non solo difendeva le proprie idee scientifiche, ma rintuzzava gli attacchi alla propria personalità. Aveva ritrattato, e poi riproposto le sue idee sul comportamento dell'occhio quando aveva avuto a disposizione nuove informazioni, e Brougham aveva utilizzato quel suo comportamento per caratterizzarlo come un uomo dalle idee confuse. Young in risposta espose una storia dettagliata di tutta la controversia, spiegando perché aveva compiuto quelle azioni. Alla fine, però, sembrava logorato dalla controversia che aveva perseguitato i suoi sforzi scientifici sin dall'inizio, e annunciava l'intenzione di tornare alla medicina.

Con questo lavoro, il mio impegno nella scienza generale terminerà: da qui in poi ho deciso di limitare i miei studi e i miei scritti solo ad argomenti medici. Per i talenti che Dio non mi ha dato non sono responsabile, ma fin qui ho coltivato e utilizzato quelli che possiedo, come le occasioni mi hanno consentito di fare; e continuerò ad applicarli assiduamente, e nella tranquillità, a quella professione che è stata costantemente l'obiettivo ultimo di tutte le mie fatiche.[16]

Per un po', in effetti, al di là della pubblicazione del suo *Course of Lectures on Natural Philosophy*, Young tornò ai suoi studi di medicina. Aveva rinunciato all'incarico presso la Royal Institution nel 1803, e finalmente ottenne l'accreditamento necessario per diventare medico all'Ospedale di San Giorgio. Gli studiosi di ottica continuarono a trattare la luce come un flusso di particelle e non come un'onda, ma la teoria della luce di Young presto sarebbe stata convalidata in modo spettacolare, e gli avrebbe assicurato un posto fra i più grandi scienziati del diciannovesimo secolo.

Il più famoso dei contributi di Young all'ottica, la legge dell'interferenza, fu descritta in modo elegante anni dopo da François Arago, che in un ricordo biografico di Young nel 1835 scrisse: "Chi non sarebbe sorpreso di scoprire l'oscurità nei raggi del sole, in punti

che i raggi di quel corpo luminoso raggiungono liberamente; e chi immaginerebbe che qualcuno potesse supporre che l'oscurità può essere prodotta da luce che si somma a luce!".[17]

Nessuno dei ricercatori dell'epoca poteva saperlo, ma la scoperta della legge dell'interferenza da parte di Young è stata un grande passo avanti anche per la teoria dell'invisibilità. L'interferenza mostrava che le onde luminose, nelle circostanze giuste, possono cancellarsi a vicenda. Alla fine, una nuova forma di interferenza si sarebbe dimostrata un ingrediente fondamentale per la creazione di oggetti invisibili nella fisica.

---

1 È divertente raccontare quanto siano state brillanti nell'infanzia persone come Young, ma può dare l'impressione errata che tutti gli scienziati debbano essere geni per natura. In base alla mia esperienza, per ogni scienziato di successo che ha avuto un'infanzia eccezionale ne esistono innumerevoli che hanno avuto una fanciullezza del tutto normale.

2 Peacock, *Life of Young*, p. 6.

3 Per un po' di contesto sull'età del San Bartolomeo: fu fondato solo 24 anni dopo la fine della prima Crociata.

4 Young, *Observations on Vision*.

5 Young, *Outlines of Experiments and Inquiries respecting Sound and Light*.

6 Young, *Mechanism of the Eye*.

7 Young, *Outlines of Experiments and Inquiries respecting Sound and Light*, p. 118.

8 Young, *Theory of Light and Colours*.

9 Ivi, p. 34.

10 Young, "Account of Some Cases of Production of Colours".

11 Young, "Experiments and Calculations relative to Physical Optics".

12 Young, *Course of Lectures on Natural Philosophy*.

13 [Brougham],"Bakerian Lecture on Theory of Light and Colours", p. 450.

14 [Brougham], "Account of Some Cases of Production of Colours", p. 457.

15 Young, *Reply to the Animadversions of the Edinburgh Reviewers*, p. 3.

16 Ivi, p. 37.

17 Arago, *Biographical Memoir of Young*, p. 227.

Capitolo 6

La luce vibra trasversalmente

> Curtis Whateley.– del ramo non decaduto – osservava con il binocolo quando i tre uomini sulla collina deviarono nettamente dalla scia che seguivano con circospezione. Comunicò alla gente assiepata intorno a lui che evidentemente stavano cercando di raggiungere un'altura secondaria che dominava il solco, molto più avanti rispetto al punto dove gli arbusti venivano schiacciati in quel momento. Aveva ragione. E il gruppetto fu visto guadagnare il poggio poco dopo che l'invisibile abominio lo aveva oltrepassato.
> Poi Wesley Corey, che aveva strappato il binocolo a Curtis Whateley, gridò che Armitage stava mettendo a punto lo spruzzatore retto da Rice e che di sicuro stava per succedere qualcosa. I contadini si agitarono inquieti, ricordando che lo spruzzatore avrebbe dovuto rendere visibile, per un attimo, il mostro sconosciuto. Due o tre uomini chiusero gli occhi, ma Curtis Whateley riprese il binocolo e ne aggiustò con precisione le lenti. Vide che Rice, dall'altura elevata alle spalle dell'entità, si era venuto a trovare in posizione ottimale per spruzzare la polvere portentosa. L'effetto fu stupefacente.
> – H.P. Lovecraft, *The Dunwich Horror* (1929) [trad. it. p. 628]

La teoria ondulatoria della luce sembrerebbe tornare in letargo dopo i lavori di Young, ma, dietro le quinte, altri stavano seguendo le sue orme e sviluppavano una robusta teoria matematica a sostegno delle sue osservazioni. Questi sforzi avrebbero avuto come risultato nuove, sorprendenti idee sulla natura della luce, ed ebbero inizio con una gara.

Il 17 marzo 1817, l'Accademia francese delle scienze annunciò che il tema per il premio che sarebbe stato assegnato due anni dopo, nel 1819, era la diffrazione, la "frammentazione" della luce al passaggio attraverso un foro di piccole dimensioni. I Grand Prix dell'Accademia miravano a favorire l'innovazione nella fisica e a sollecitare soluzioni a interrogativi ancora senza risposta, e la diffrazione rimaneva un

rompicapo. Uno dei concorrenti fu un ingegnere civile di 28 anni, Augustin-Jean Fresnel, che presentò una ampia teoria ondulatoria della luce, sostenuta da lavori sperimentali.

Come Young, Fresnel si interessava da tempo a problemi di ottica e aveva trovato a sua volta il tempo libero per esplorarli, ma per circostanze molto diverse. Napoleone Bonaparte, che era stato esiliato sull'isola d'Elba nel 1814, ne era fuggito nel febbraio 1815 con l'intento di riconquistare il trono. Fresnel era fra quanti si erano arruolati nella resistenza realista contro Napoleone, ma si era ammalato e non aveva avuto la possibilità di partecipare direttamente. Quando Napoleone divenne nuovamente imperatore, Fresnel si trovò ostracizzato e condannato agli arresti domiciliari, che trascorse nella casa della madre. Con quel tempo libero forzato, fu stimolato a iniziare la sua serie di indagini nel campo dell'ottica, che continuò a perseguire anche quando Napoleone fu nuovamente detronizzato alla metà del 1815 e Fresnel fu reintegrato nel suo ruolo di ingegnere civile. Nell'arco degli anni successivi, chiese varie volte un congedo per poter attendere ulteriormente ai suoi studi di ottica.

Fresnel era rimasto da tempo affascinato dalla possibilità che la luce fosse un'onda. Nel corso delle sue ricerche, iniziò una corrispondenza con il fisico francese François Arago, che lo indirizzò ai lavori di Thomas Young. Arago gli fece notare che aveva ripercorso senza rendersene conto molti dei passi che aveva già intrapreso Young, ma in generale lo incoraggiò. Quando l'Accademia delle scienze annunciò che la diffrazione sarebbe stata il problema per il premio del 1819, Arago convinse Fresnel a presentare la sua teoria matematica dell'ottica ondulatoria.

Della commissione incaricata di valutare i contributi per il premio facevano parte alcune delle figure più importanti della fisica del tempo: François Arago, Pierre-Simon Laplace, Siméon Denis Poisson

e Joseph Louis Gay-Lussac. Fresnel presentò il suo lavoro il 29 giugno 1818 e la commissione lo esaminò approfonditamente. Poisson, uno dei sostenitori della teoria corpuscolare della luce, notò una conseguenza curiosa della nuova teoria ondulatoria di Fresnel, che si presenta quando si calcola la diffrazione della luce intorno a un disco circolare opaco. Secondo la legge dell'interferenza, mostrò Poisson, ci si aspetterebbe che sul lato in ombra vi sia una linea luminosa allineata con l'asse del disco, poiché le onde diffratte da tutti i bordi del disco dovrebbero interferire costruttivamente su quell'asse. Per i sostenitori della teoria corpuscolare era una conclusione assurda: come era possibile che la luce apparisse miracolosamente nel mezzo di un'ombra? Arago realizzò l'esperimento e confermò che la linea luminosa appariva proprio dove era prevista dalla teoria di Fresnel: è quella che oggi viene chiamato macchia di Poisson (o macchia di Fresnel o anche punto di Arago).

A Fresnel venne assegnato il Grand Prix per il suo contributo: l'annuncio ebbe luogo il 15 marzo 1819, durante una riunione dell'Accademia. Il premio da solo non fu sufficiente a convincere tutti che la luce è un'onda, ma fu un punto di svolta per l'accettazione della teoria. Il punto di Arago dimostrava che la teoria ondulatoria poteva non solo spiegare le osservazioni sperimentali precedenti, ma anche prevedere nuovi fenomeni. Questo spinse altri scienziati a esplorare le possibilità, e nuove prove a sostegno della teoria ondulatoria cominciarono ad accumularsi, finendo per ridurre al silenzio anche i più strenui difensori della teoria corpuscolare di Newton. L'era della teoria ondulatoria della luce era iniziata.

Fresnel ebbe poi una carriera straordinaria nell'ottica, come testimoniano i sette concetti che portano il suo nome, ma fu interrotta quando la sua salute iniziò a declinare, verso la fine del 1822 e gli fu diagnosticata la tubercolosi. Fresnel diminuì i suoi impegni per ridurre

lo stress e prolungare la propria esistenza, concentrandosi sullo sviluppo di una lente leggera che potesse essere utilizzata per concentrare i fasci di luce di un faro. Quel tipo di lente è in uso ancora oggi e va sotto il nome proprio di lente di Fresnel. Rallentare la propria attività scientifica non fu sufficiente, però, e Fresnel morì nel luglio 1827, a soli 39 anni.

Anche se si era tenuto in disparte e aveva evitato di partecipare alle discussioni pubbliche sull'ottica nel periodo in cui Fresnel aveva condotto i suoi studi sulla diffrazione, Thomas Young era rimasto attivo nella sua vita privata e, in effetti, ebbe un ruolo centrale per l'accettazione finale della teoria ondulatoria. Fresnel aveva tentato di spiegare il mistero della diffrazione nel 1815 e, come abbiamo notato, la sua corrispondenza con Arago lo aveva spinto a scrivere direttamente a Young, in parte per scusarsi per avere duplicato senza saperlo il suo lavoro. Arago, incuriosito dalle possibilità della teoria ondulatoria, fece visita a Young nel 1816, insieme con il fisico Joseph Louis Gay-Lussac. Gli scienziati francesi avevano portato con sé quelli che credevano fossero nuovi risultati in grado di rafforzare la teoria di Young, ma questi fece notare loro che aveva già spiegato il fenomeno in questione anni prima. Ne venne fuori una delle scene che preferisco nella storia dell'ottica.

> Questa affermazione ci sembrava priva di fondamento, e ne seguì una lunga discussione, molto dettagliata. La signora Young era presente, ma non vi prendeva parte – il timore di coprirsi del ridicolo implicito nel soprannome di *bas bleus* fa sì che le signore inglesi siano molto riservate in presenza di estranei; l'aver trascurato le buone maniere non ci colpì fino al momento in cui la signora Young non uscì dalla stanza un po' precipitosamente. Stavamo iniziando a scusarci con suo marito, quando la vedemmo tornare con un enorme libro in quarto sotto il braccio. Era il primo volume del *Treatise on Natural Philosophy*. Lo mise sul tavolo, lo aprì, senza dire una parola, alla pagina 387, e ci mostrò con il dito un'illustrazione in cui l'andamento curvilineo delle frange di diffrazione, che erano l'argomento della discussione, si trova stabilito teoricamente.[1]

La visita di Arago e Gay-Lussac portò a Young informazioni sui risultati più recenti relativi a un altro importante mistero insoluto della luce, quello della polarizzazione. Da secoli era stato notato che la luce che attraversa un cristallo incolore, chiamato spato d'Islanda (calcite ottica), produce *due* immagini di quello che si trova dietro il cristallo (Figura 6.1).
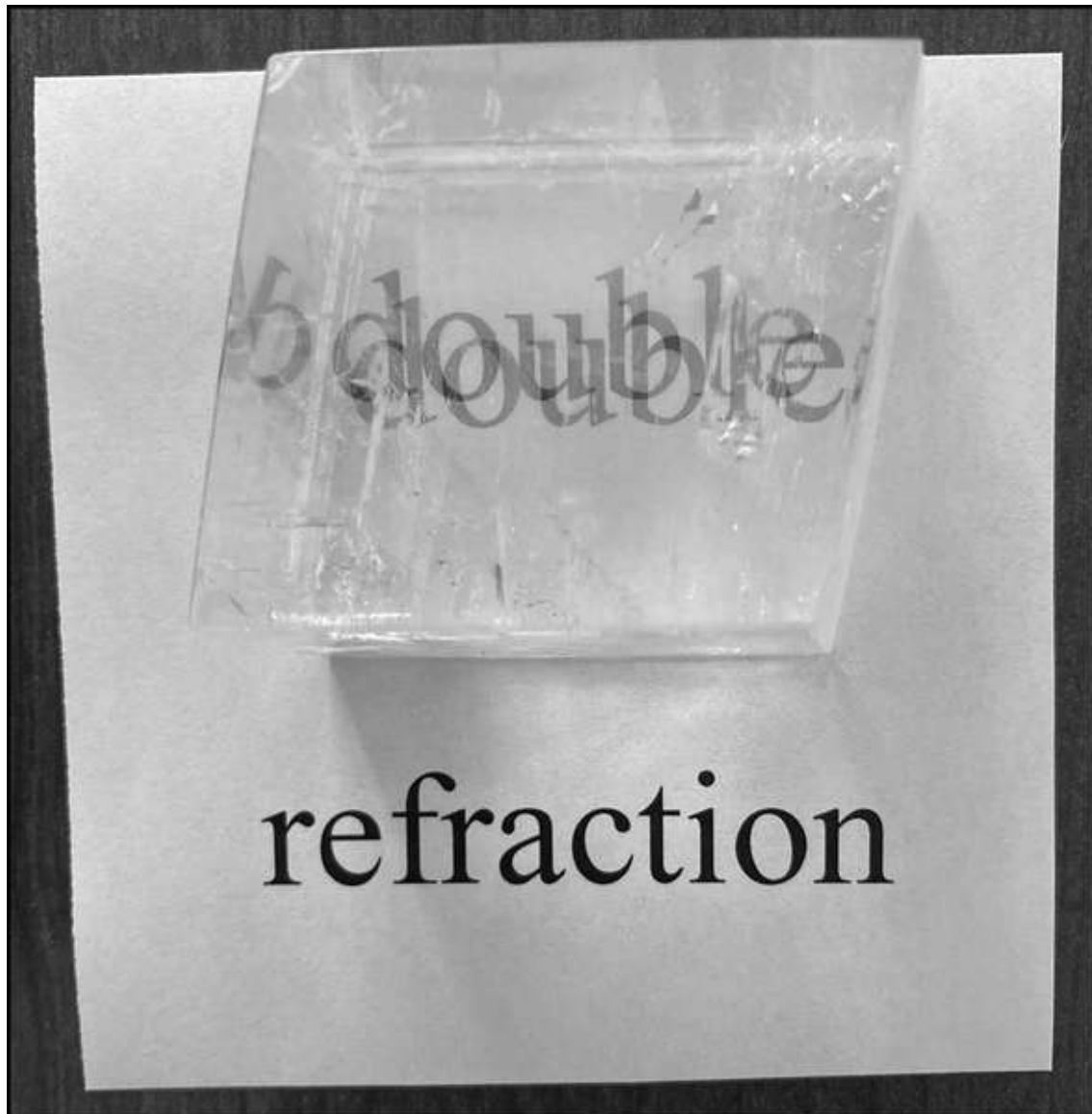
Figura 6.1 La doppia rifrazione attraverso la calcite ottica.

Né i sostenitori della natura ondulatoria della luce, né quelli della sua natura corpuscolare erano in grado di dare una spiegazione soddisfacente di quella doppia immagine, che evidentemente comporta che metà della luce passante attraverso il cristallo venga rifratta a un certo angolo e l'altra metà a un angolo diverso. Il fenomeno è noto come doppia rifrazione o, con un termine più tecnico, come birifrangenza.

Un indizio importante della natura della doppia rifrazione fu scoperto nel 1808 dal fisico francese Étienne-Louis Malus, che un giorno per caso osservò attraverso un pezzo di spato d'Islanda il sole calante, riflesso dalle finestre del Palazzo del Lussemburgo a Parigi. Scoprì, meravigliato, che una delle due immagini era molto più luminosa dell'altra e che, ruotando il cristallo, cambiava anche quale delle due era più luminosa. Scoprì poi che la luce riflessa da un vetro a un certo angolo produce solo un'immagine nello spato d'Islanda e alla luce che produce un'unica immagine diede il nome di "polarizzata". La luce riflessa da un pezzo di vetro disposto orizzontalmente sarebbe stata chiamata "polarizzata orizzontalmente", quella riflessa da un pezzo di vetro in verticale "polarizzata verticalmente". Lavorando insieme, Fresnel e Arago dimostrarono, in una serie di esperimenti, che inviando luce polarizzata verticalmente a una fenditura e luce polarizzata orizzontalmente all'altra, nell'esperimento di Young, non si generava una figura di interferenza; per qualche ragione, i fasci di luce con polarizzazione diversa non interferivano.

Young cercò una possibile spiegazione per questi effetti, e iniziò ancora una volta facendo ricorso a un'analogia con le onde sonore. Altri scienziati avevano scoperto che le onde acustiche che si propagano in un pezzo di legno, in particolare di pino silvestre, viaggiano più velocemente quando si propagano lungo le fibre del legno che quando si propagano trasversalmente alle fibre. Young,

come molti altri, aveva supposto che qualcosa del genere debba accadere nello spato d’Islanda: il cristallo doveva avere qualche struttura interna che faceva propagare la luce più velocemente in una direzione che in un’altra, e il risultato sarebbero stati due indici di rifrazione differenti. Non riusciva però a spiegare come lo spato d’Islanda produca due immagini, quando è attraversato dalla luce.

Verso la fine del 1816 Young finalmente trovò la soluzione e la comunicò ad Arago in una lettera datata 12 gennaio 1817, determinando un’ulteriore svolta importante nella comprensione della luce. Young era arrivato alla conclusione che la luce è un’onda trasversale, le cui vibrazioni sono perpendicolari alla direzione di propagazione, a differenza delle onde acustiche, le cui vibrazioni avvengono nella direzione di propagazione.

Per visualizzare questo fatto, la cosa migliore è utilizzare un classico cordone elastico a spirale del telefono, del tipo ormai usato raramente ai nostri giorni (Figura 6.2)[2]. Immaginate di fissare un capo del cordone a un oggetto distante e di tendere l’altra estremità. Per prima cosa prendiamo con una mano un pezzo del cordone, lo tiriamo verso di noi e lo lasciamo andare: il risultato è un’onda con regioni alternate in cui il cordone è rispettivamente teso e compresso. Questa è un’onda longitudinale, come un’onda acustica; le vibrazioni viaggiano lungo la lunghezza del cordone, nella stessa direzione in cui si propaga l’onda. Possiamo però anche fare ondeggiare su e giù l’estremità libera del cordone: anche le onde ora salgono e scendono, perpendicolari alla direzione lungo cui viaggia l’onda stessa. Questo è un esempio di onda trasversale. Però possiamo anche muovere il cordone lateralmente, producendo onde che sono a loro volta laterali: questa è un’altra onda trasversale, diversa da quella che va su e giù!
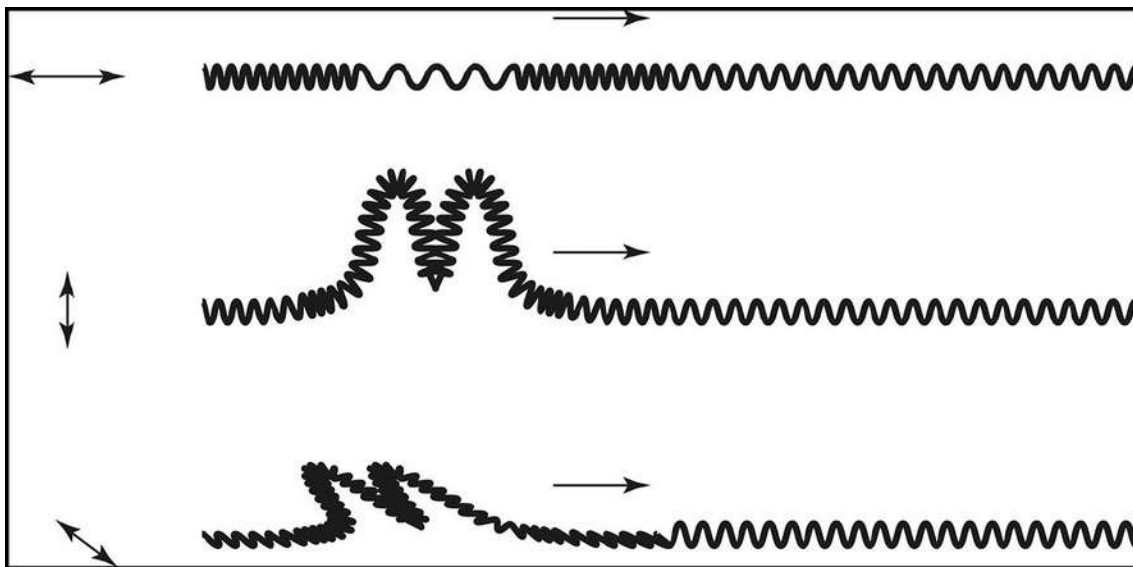
Figura 6.2 La creazione di onde longitudinali e di due tipi distinti di onde trasversali in un cordone del telefono. (Sempre che qualcuno ancora sappia che cos'è un "cordone del telefono".)

Questa è la spiegazione che Young diede del fenomeno della doppia rifrazione: la luce è un'onda trasversale e, quale che sia la direzione da cui si propaga, esistono due possibili polarizzazioni. La luce naturale, come quella solare, in genere è formata da una miscela delle due polarizzazioni, che per semplicità chiameremo "su e giù" e "di lato". Il cristallo ha una struttura interna che risponde in modo diverso alle due polarizzazioni: si dice che ha una struttura anisotropa. Il termine "anisotropo" deriva dalle parole greche *anisos* (disuguale) e *tròpo* (volgersi). Poiché ciascuna polarizzazione si propaga in modo diverso nel cristallo, il risultato sono due onde rifratte distinte e due immagini. La spiegazione di Young si è dimostrata corretta, e le proprietà della luce come onda trasversale (la polarizzazione) sono importanti sia per la scienza della luce che per le sue applicazioni.

Young non tornò più a essere uno scienziato a tempo pieno, ma i suoi contributi fondamentali alla teoria della luce erano innegabili e furono riconosciuti in tutto il mondo. Negli anni Venti dell'Ottocento,

fu eletto a far parte delle Accademie delle scienze di Stati Uniti, Francia, Svezia e Olanda.

Fedele alle sue tendenze poliedriche, Young passò i suoi ultimi anni a esplorare molti argomenti diversi. Scrisse numerosi libri importanti di medicina e articoli su vari temi, fra cui l'ottica, per l'*Encyclopedia Britannica*. Fece parte di comitati e commissioni pubbliche, fra cui una incaricata di studiare i possibili pericoli dell'introduzione dell'illuminazione a gas a Londra. Applicò il suo talento per le lingue alla decifrazione dei geroglifici egiziani, che a quel tempo erano ancora un mistero.

Quando morì, a 55 anni, era ormai riconosciuto come un genio singolare del proprio tempo. Nel 1834 fu installata nell'Abbazia di Westminster una tavoletta di marmo bianco, con un epitaffio di Hudson Gurney, l'amico di famiglia di cui Young era stato tutore molti anni prima.

> Consacrata alla memoria di Thomas Young, medico, fellow e segretario estero della Royal Society, membro dell'Istituto nazionale di Francia; un uomo parimenti eminente in quasi tutti i campi della conoscenza umana. Tollerante di fatiche ininterrotte, dotato della facoltà di percezione intuitiva, che, dimostrando pari abilità nelle indagini più astruse delle lettere e delle scienze, stabilì per primo la teoria ondulatoria della luce, e per primo penetrò l'oscurità che per secoli ha avvolto i geroglifici d'Egitto. Caro agli amici per le sue virtù private, onorato dal mondo per i suoi traguardi senza rivali, morì nella speranza della resurrezione dei giusti. Nato a Milverton, Somersetshire, il 13 giugno 1773. Morto a Park Squadre, Londra, il 10 maggio 1829, nel suo 56-esimo anno d'età.

La scoperta di Young, che la luce è un'onda trasversale, si sarebbe dimostrata importante per la scienza quanto la sua legge dell'interferenza, perché rispondeva a molti interrogativi sulla fisica della luce e ne sollevava di nuovi, a cui avrebbero dovuto rispondere gli scienziati futuri. Il fenomeno della doppia rifrazione e lo spato d'Islanda in cui si manifesta si sarebbero poi dimostrati strumenti importanti per portare l'invisibilità più vicina alla sua realizzazione.

[1] Peacock, *Life of Young, p.* 389. “*Bas bleu*” significa letteralmente “calza turchina”, ed è un’espressione, come spiega il vocabolario Treccani online, “nata in Inghilterra intorno alla metà del ’700 e usata per indicare ironicamente donna letterata saccente: sembra che le calze di quel colore fossero (per gli uomini più che per le donne) indizio di trascuratezza nel vestire” (https://www.treccani.it/vocabolario/bas-bleu/).

[2] Funzionerà anche un classico giocattolo Slinky, che è sostanzialmente una molla elicoidale.

Capitolo 7

Magneti, correnti e luce

Il tubo di cristallo il raggio elettrico
mostra otticamente limpido,
senza polvere o foschia, ma ferma!
Non tutto è stato ancora visto.
Che bagliori sono questi di celeste blu?
Quale forma appare tratta dall'aria,
Quale pesce mistico, che, come fantasma,
Nello spazio vuoto si muove?
– James Clerk Maxwell, *To the Chief Musician upon Nabla* (1874)

Come accade regolarmente per la maggior parte delle grandi scoperte scientifiche, quella della natura ondulatoria della luce ha finito per sollevare tanti interrogativi quanti ne aveva risolti. Una domanda che nasceva immediatamente era: che cosa, in un'onda di luce, "ondeggia"? Nelle onde di uno stagno quella che ondeggia è l'acqua, e nelle onde sonore è la variazione di densità delle molecole dell'acqua. Nel caso di una corda che vibra è la corda stessa che si muove, trasmettendo le onde. All'epoca di Thomas Young, però, non era affatto chiaro che cosa venisse perturbato per produrre un'onda luminosa. Per analogia con gli esempi precedenti, si dava per scontato che ci fosse qualche tipo di materiale che permeava lo spazio e trasportava le vibrazioni della luce: veniva chiamato "etere", alludendo alle sue caratteristiche misteriose e intangibili. Per avere una risposta migliore alla domanda "Che cosa vibra nella luce?" ci sarebbero voluti ancora circa sessant'anni di ricerche e ipotesi, che avrebbero portato al riconoscimento che la luce è una cosa che in precedenza non si sarebbe

immaginato: una perturbazione di campi elettrici e magnetici che si propagano nello spazio, mantenendosi a vicenda. Oggi per noi la luce è un'onda elettromagnetica e sappiamo che la radiazione infrarossa e quella ultravioletta sono solo onde elettromagnetiche di frequenze diverse. Il primo indizio che avrebbe portato a queste scoperte fu individuato nel 1820 da un filosofo danese, in un esperimento del tutto peculiare nella storia della scienza.

Per secoli, scienziati e filosofi naturali avevano considerato elettricità e magnetismo due fenomeni distinti. L'elettricità era associata a piccole scariche nelle giornate fredde e asciutte, ai fulmini e a deboli forze attrattive che potevano essere generate strofinando bastoncini di ambra con pelliccia di animali. Il magnetismo era associato a cose come le bussole e le calamite. Gli oggetti carichi di elettricità sembravano attrarsi o respingersi a vicenda completamente; gli oggetti magnetici possedevano un polo nord e un polo sud, i poli identici si respingevano e quelli opposti si attraevano.

Vari esperimenti isolati suggerivano l'esistenza di un legame fra elettricità e magnetismo: Benjamin Franklin aveva magnetizzato degli aghi colpendoli con scariche di elettricità e i marinai a volte avevano raccontato che gli aghi delle bussole avevano invertito la loro polarità dopo che la nave era stata colpita da un fulmine. Inoltre, a nessuno sfuggiva che elettricità e magnetismo coinvolgevano forze attrattive e repulsive simili. Altri esperimenti, però, non portavano ad alcuna conclusione, e la maggior parte degli scienziati più eminenti avevano liquidato la possibilità di una connessione significativa. Nel suo *Natural Philosophy* (1807), Thomas Young aveva scritto: “Non esiste alcun motivo per immaginare una qualsiasi connessione immediata tra magnetismo ed elettricità, tranne che l'elettricità influisce sulla capacità di conduzione del magnetismo nel ferro o nell'acciaio, così come il calore o il movimento”[1].

Questa è la situazione, finché non arriva il filosofo danese Hans Christian Oersted (1777-1851). Figlio di un farmacista, Oersted aveva iniziato a interessarsi alla scienza lavorando nel negozio del padre. La sua prima istruzione avvenne in casa, con ottimi risultati: fu ammesso all'Università di Copenhagen nel 1793 e ottenne riconoscimenti per i suoi saggi sull'estetica e sulla fisica. Ottenne il dottorato nel 1799, a 22 anni, con una tesi sulla metafisica di Immanuel Kant, intitolata *Dissertatio de forma metaphysices elementaris naturae externae* ("Dissertazione sulla struttura della metafisica elementare della natura esterna").

La formazione filosofica avrebbe avuto un ruolo fondamentale nella sua scoperta dell'elettromagnetismo. Nel 1801 vinse una borsa di studio che gli consentì di viaggiare per anni in Europa. Mentre era in Germania, si inserì nei circoli filosofici tedeschi, dove venne a contatto con il movimento della Naturphilosophie, di cui abbiamo già parlato. Trascorse del tempo anche con Johann Wilhelm Ritter, scopritore della luce ultravioletta e convinto alfiere della Naturphilosophie, e sviluppò un interesse per come il movimento filosofico potesse essere utilizzato per ottenere nuove scoperte scientifiche. Gli aderenti alla Naturphilosophie, convinti che tutti i fenomeni naturali siano connessi, erano naturalmente convinti della possibilità che anche elettricità e magnetismo fossero in qualche modo in relazione fra loro.

Oersted divenne professore all'Università di Copenhagen nel 1806 e portò con sé le convinzioni derivategli da Ritter e dalla Naturphilosophie. Negli anni successivi, condusse ricerche sull'elettricità e sull'acustica e al contempo sviluppò i programmi di fisica e di chimica dell'università.

Nel semestre invernale del 1819-20, Oersted teneva una serie di lezioni sull'elettricità e il magnetismo. Il 21 aprile 1820 era in programma una lezione sulle ben note somiglianze fra forze elettriche

e magnetiche, e si mise a riflettere sulle proprie convinzioni in merito alla loro connessione. Si chiese di nuovo se fosse possibile produrre qualche tipo di effetto magnetico utilizzando una corrente elettrica e decise di preparare un piccolo esperimento per cercare un effetto del genere. Collocò un pezzo di filo elettrico su una bussola, separati da un vetro. L'idea era vedere se, al passaggio della corrente elettrica nel filo, si manifestasse qualche effetto sulla bussola[2].

Lasciamo la parola a Oersted, che descrisse in terza persona, una decina di anni dopo, quello che successe.

> Furono fatti i preparativi per l'esperimento, ma, non avendo potuto provarlo prima della lezione, a causa di qualche impedimento, aveva intenzione di lasciarlo per qualche altra occasione; tuttavia, durante la lezione, le probabilità di successo erano sembrate maggiori, perciò fece il primo esperimento alla presenza del pubblico. L'ago magnetico, anche se all'interno di un contenitore, fu perturbato, ma l'effetto era molto debole e, prima che la sua legge fosse scoperta, dovette sembrare molto irregolare, perciò l'esperimento non fece una grande impressione sul pubblico.[3]

Grazie a una semplice oscillazione dell'ago di una bussola, Oersted aveva dimostrato che le correnti elettriche producono un effetto magnetico, e così facendo rivoluzionò la fisica. Poiché non aveva potuto provare l'esperimento in anticipo, la dimostrazione avvenne in aula, con gli studenti che lo osservavano. È possibile che sia stata l'unica grande scoperta scientifica della storia avvenuta in pubblico. Forse non sorprende che l'esperimento "non fece una grande impressione", considerando che il suo pubblico non sapeva che cosa stesse vedendo.

Oersted non annunciò immediatamente i suoi risultati al mondo, e gli ci vollero vari mesi per condurre ulteriori esperimenti. Nel giugno 1820, però, aveva condotto un numero sufficiente di prove e scrisse un articolo in cui presentava le sue osservazioni. L'articolo fu pubblicato per la prima volta in latino, ma fu rapidamente tradotto in molte lingue. Il titolo era "Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam" ("Esperimenti sull'effetto di una corrente elettrica

su un ago magnetico”)[4]. Il suo lavoro incontrò subito un grande interesse, e scienziati di tutta Europa si recarono a incontrarlo per discuterne.

Scoperto che l’elettricità può produrre effetti magnetici, venne naturale cominciare a chiedersi se fosse vero anche l’opposto: un magnete può produrre effetti elettrici? Nel corso del decennio successivo, molti tentarono di stabilire una tale connessione, ma fallirono. Alla fine, fu uno scienziato inglese, Michael Faraday, che aveva iniziato la sua carriera lavorativa come semplice apprendista legatore di libri, a realizzare la successiva scoperta innovativa.

Nato nel 1791, figlio di un fabbro, Michael Faraday visse in un’epoca in cui la scienza era quasi esclusivamente una prerogativa delle classi superiori. Ebbe una scarsa istruzione formale e, quando divenne apprendista legatore a 14 anni, sembrava destinato a una vita senza distinzioni. Faraday, però, era un lettore accanito e il lavoro presso la libreria di George Riebau gli dava la possibilità di accedere a tutti i libri che poteva desiderare. Il primo libro scientifico che catturò la sua attenzione fu un volume di un’enciclopedia del 1797, che conteneva una voce sull’elettricità. Incuriosito, spese parte dei suoi magri risparmi per acquistare un proprio apparato elettrico e cercò di riprodurre alcuni dei risultati di cui si parlava in quelle pagine.

Nel 1810 arrivò da Riebau un altro libro, *Conversations on Chemistry* di Jane Marcet. Autodidatta, Marcet aveva condotto esperimenti in casa con l’aiuto del marito, Alexander, un medico. Volendo saperne di più, aveva seguito le lezioni del famoso chimico Humphry Davy alla Royal Institution, la stessa in cui aveva lavorato Thomas Young, e questo aveva fatto nascere in lei la determinazione di scrivere un libro divulgativo sulla chimica che fosse comprensibile a donne che, come lei, non avevano altrimenti molte occasioni di

avvicinarsi alla scienza. Il risultato, *Conversations on Chemistry*, fu pubblicato nel 1805 ed ebbe sedici edizioni.

Il libro di Marcet era una lettura ideale per l'autodidatta Faraday. Ne divorò il contenuto, lo imparò e fu motivato a perseguire gli studi di chimica. Nel 1812, quando il suo apprendistato stava per concludersi, desiderava ardentemente trovarsi un lavoro in campo scientifico, se appena fosse stato possibile. Oltre ad amare lo studio della scienza, Faraday considerava le professioni commerciali "perverse ed egoistiche" e riteneva che la scienza rendesse i suoi cultori "amabili e liberali", una finalità nobile a cui aspirava[5].

Una combinazione di determinazione e buona sorte avrebbero portato Faraday sulla strada della scienza. Grazie al suo lavoro, aveva stretto amicizia con William Dance, pianista e violinista, il quale era rimasto colpito dalla diligenza e dall'impegno di Faraday. Agli inizi del 1812, Dance gli procurò i biglietti per seguire le conferenze di chimica di Humphry Davy, e il giovane Faraday prese appunti dettagliati di tutto quello che apprendeva. Ulteriormente incoraggiato da Dance, scrisse a Davy per sapere se ci fossero possibilità di lavorare presso la Royal Institution, e incluse i suoi appunti. Verso la fine di dicembre 1812, Davy gli rispose gentilmente, dicendosi disponibile a incontrarlo non appena possibile.

Faraday, che a quel punto lavorava ufficialmente come legatore, dovette attendere ansiosamente cinque settimane perché Davy tornasse in città e gli fosse possibile incontrarlo. Il risultato però valeva l'attesa: Davy gli disse che era vacante un posto come assistente preparatore alla Royal Institution e che pensava che Faraday fosse adatto a quel lavoro. Un po' sardonicamente, però, gli suggeriva che quella del rilegatore forse era una professione più stabile e nobile a cui aspirare, come ricordava Faraday in seguito.

> Pur contribuendo a soddisfare alle mie aspirazioni scientifiche, mi consigliò di non rinunciare alla prospettiva che mi stava dinanzi; mi disse che la scienza è una severa

amica, e che pecuniariamente parlando essa ricompensa male chi si dedica a servirla. L'idea che mi ero formata della superiorità morale degli scienziati lo fece sorridere, ed aggiunse che lascerebbe all'esperienza di alcuni anni la cura di illuminarmi su questo argomento.[6]

Il nuovo impiego non sarebbe iniziato immediatamente, perciò Faraday continuò a lavorare per un altro mese come legatore, mentre ogni tanto aiutava Humphry Davy a prendere appunti. Davy si era infortunato agli occhi a causa di un'esplosione l'anno precedente, e la vista non gli era tornata ancora normale nel febbraio del 1813. Nel mese di marzo, comunque, Faraday fu assunto ufficialmente come nuovo assistente preparatore alla Royal Institution.

Per interessante che fosse quella opportunità, Faraday ne ebbe presto una ancora migliore. Non molto dopo l'assunzione di Faraday, Davy rinunciò alla posizione di professore alla Royal Institution e si preparò a iniziare un tour di più anni nell'Europa continentale. Si respirava però aria di guerra e il cameriere di Davy si rifiutò di intraprendere quel viaggio potenzialmente pericoloso. Davy offrì a Faraday di portarlo con sé nel duplice ruolo di cameriere e di preparatore.

L'opportunità di incontrare alcuni degli scienziati più importanti d'Europa e di vedere il continente era troppo ghiotta per lasciarsela scappare, nonostante l'ignominia di dover lavorare come cameriere. Il viaggio fu ampiamente gratificante: Faraday fece colpo sui colleghi di Davy con le sue capacità e la sua cortesia, e quei contatti gli sarebbero stati utili in futuro. Ebbe addirittura l'occasione di incontrare a Ginevra Jane Marcet, dove stava passando l'estate con il marito. La signora Davy, però, considerava Faraday più come un servitore che come uno scienziato e insisteva che prendesse i pasti con i servitori. Quando le signore si ritirarono in salotto, il marito di Marcet, Alexander, sussurrò: "E ora, miei cari signori, andiamo a fare compagnia al signor Faraday in cucina"[7].

Al ritorno a Londra, Faraday riprese l'incarico di assistente alla Royal Institution. In poco tempo fu apprezzato come eccellente conferenziere oltre che come brillante sperimentatore, e la sua fama si diffuse. Nel 1825 divenne direttore del Laboratorio della Royal Institution e, nel 1833, fu nominato Fullerian Professor of Chemistry, una posizione creata specificamente per lui e che avrebbe mantenuto per il resto della vita.

Negli anni Venti, Faraday iniziò a studiare seriamente l'elettricità, un argomento che lo aveva affascinato sin dai tempi in cui lavorava come legatore. Aveva saputo dei lavori di Oersted e, sviluppandoli, nel 1821 costruì il primo motore elettrico, un dispositivo che oggi è noto come motore omopolare. Nel decennio successivo, eseguì esperimenti di ottica, elettricità e chimica. Nel 1831 iniziò a presentare alla Royal Society una lunga serie di articoli sotto il titolo di "Experimental Researches in Electricity". Quasi subito annunciò la più famosa delle sue scoperte, che avrebbe trasformato il mondo: quella che oggi noi chiamiamo induzione elettromagnetica[8].

Faraday si era interessato all'interrogativo che aveva ossessionato gli scienziati dall'esperimento di Oersted nel 1820: se una corrente elettrica può produrre magnetismo, è possibile che un magnete in qualche modo produca elettricità? L'idea di Faraday e altri era una sorta di relazione reciproca: se una corrente elettrica può in qualche modo attrarre un magnete, allora un magnete deve poter distorcere una corrente elettrica.

Nel suo esperimento cruciale, Faraday avvolse un filo molto lungo attorno a un cilindro di legno e lo collegò a una batteria con un interruttore (Figura 7.1). Si sapeva a quel tempo che una corrente in un filo avvolto a spirale poteva produrre un campo magnetico molto forte, di intensità crescente con il numero delle spire. Al di sopra di questa struttura, isolata elettricamente, Faraday avvolse a spirale un altro filo

molto lungo, collegato a un galvanometro (chiamato così in onore di un pioniere dell'elettricità, Luigi Galvani) che misurava l'intensità della corrente elettrica.
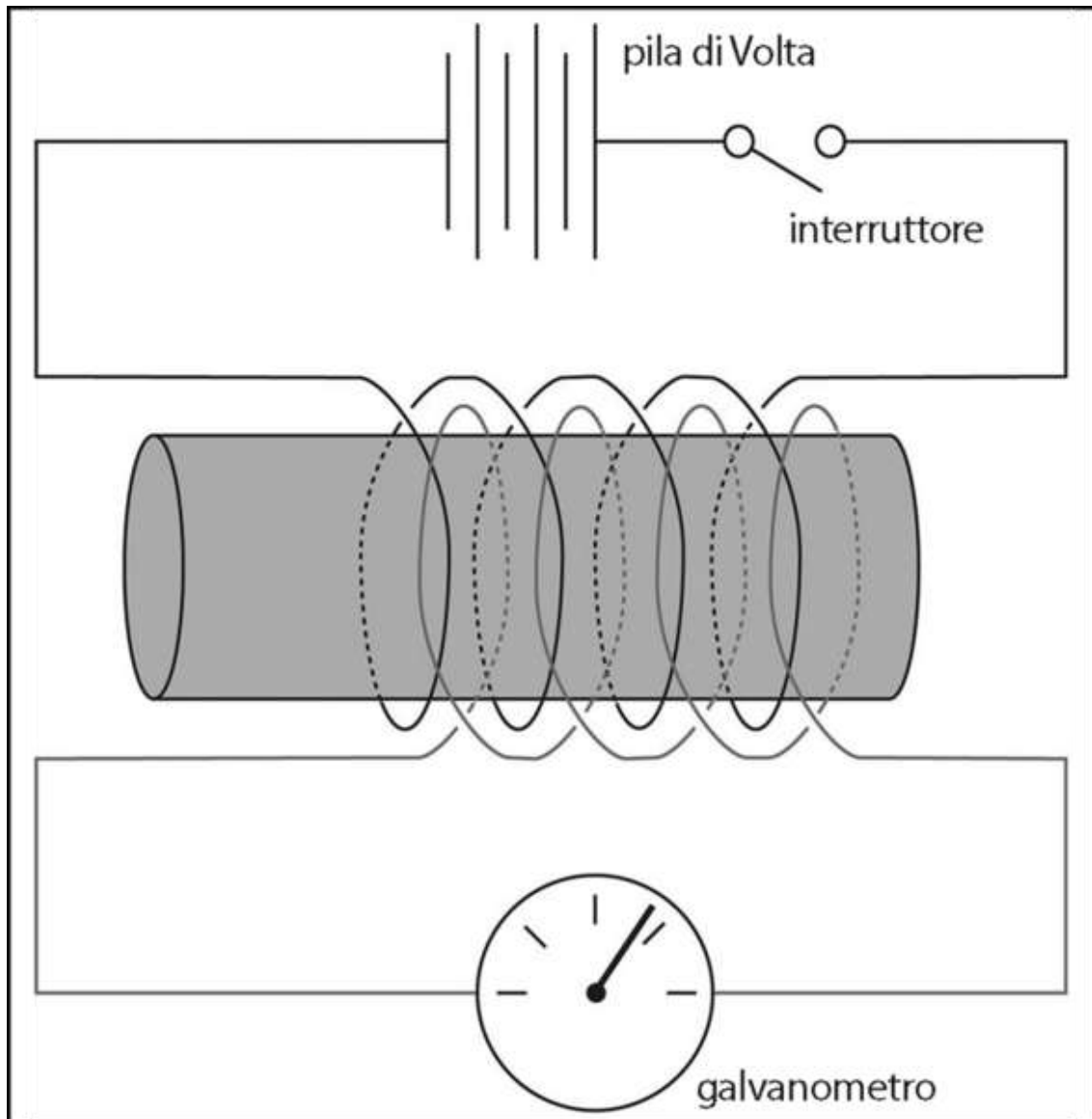
Figura 7.1 L'esperimento di Faraday sull'induzione elettromagnetica.

Quando passava corrente nel primo filo, Faraday non vedeva alcun segnale sul galvanometro, ma notò una cosa strana: l'ago del galvanometro oscillava nel momento in cui apriva o chiudeva la corrente. Era un effetto di piccola entità, come l'oscillazione dell'ago

nella bussola dell'esperimento originale di Oersted e, come quella, rappresentava una scoperta profonda.

Dopo ulteriori esperimenti, Faraday concluse, correttamente, che una *variazione* del magnetismo induce una corrente elettrica in un filo. Questo dimostrava che la connessione fra elettricità e magnetismo valeva in entrambe le direzioni, anche se in modo diverso. Il risultato di Faraday fu una rivelazione per la comunità scientifica, che ne fu immediatamente convinta.

Faraday compì molte altre scoperte importanti; dimostrò, per esempio, che le diverse manifestazioni dell'elettricità (dalle reazioni chimiche, dall'attrito e dagli animali) sono tutte equivalenti. Sottopose a test anche le capacità elettriche di animali come le "anguille elettriche", appoggiando su di essi le mani per stimare la scossa che potevano dare. A 54 anni, osservò che un campo magnetico può modificare la polarizzazione della luce, il che suggeriva una connessione fra luce, elettricità e magnetismo. L'ultimo pezzo del rompicapo che collegava tutte e tre, però, gli sarebbe sfuggito.

Jane Marcet e Michael Faraday rimasero in amicizia per tutta la vita e tennero una corrispondenza regolare. Marcet scriveva a Faraday chiedendogli spiegazioni delle sue nuove scoperte, così da includerle nelle nuove edizioni di *Conversations on Chemistry*. Faraday, per parte sua, non sottaceva l'importanza del lavoro di Marcet per la propria vita.

> Non immaginate che fossi un pensatore molto profondo, o che fossi una persona precoce. Ero una persona molto attiva e immaginativa, e potevo credere a "Le mille e una notte" come alla "Encyclopaedia"; ma i fatti erano importanti per me e mi hanno salvato. Potevo fidarmi di un fatto, e ho sempre messo alla prova ogni affermazione. Così quando ho messo in questione il libro della signora Marcet con i piccoli esperimenti per i quali potevo trovare i mezzi, e l'ho trovato fedele ai fatti come potevo comprenderli, ho avuto la sensazione di avere afferrato un'ancora nella conoscenza della chimica, e mi ci sono saldamente afferrato.[9]

Nel 1852, a 61 anni, Faraday presentò quello che sarebbe stato il suo maggiore risultato *teorico*, che si sarebbe rivelato importante non meno dei suoi contributi sperimentali, o forse ancora di più.

Dai tempi di Newton, le forze agenti fra due oggetti, come la gravità, l'elettricità e il magnetismo, erano state considerate come interazioni dirette fra quei due oggetti, e spesso definite "azioni a distanza". Che cosa causasse l'azione a distanza non era affatto chiaro e se ne discuteva molto. Qualcuno considerava il magnetismo un fluido altrimenti inosservabile, che scorreva dal polo nord di un magnete e circolava fino al polo sud.

Questa concezione del magnetismo come un fluido era corroborata da una dimostrazione sperimentale che viene utilizzata ancora oggi, sia pure con una diversa interpretazione. Nella dimostrazione, si colloca una calamita sotto un pezzo di carta e sulla carta viene disposta casualmente della limatura di ferro. Il risultato è che la limatura ruota, si aggrega e forma quelle che appaiono come linee di metallo, fra il polo nord della calamita e il suo polo sud (Figura 7.2).
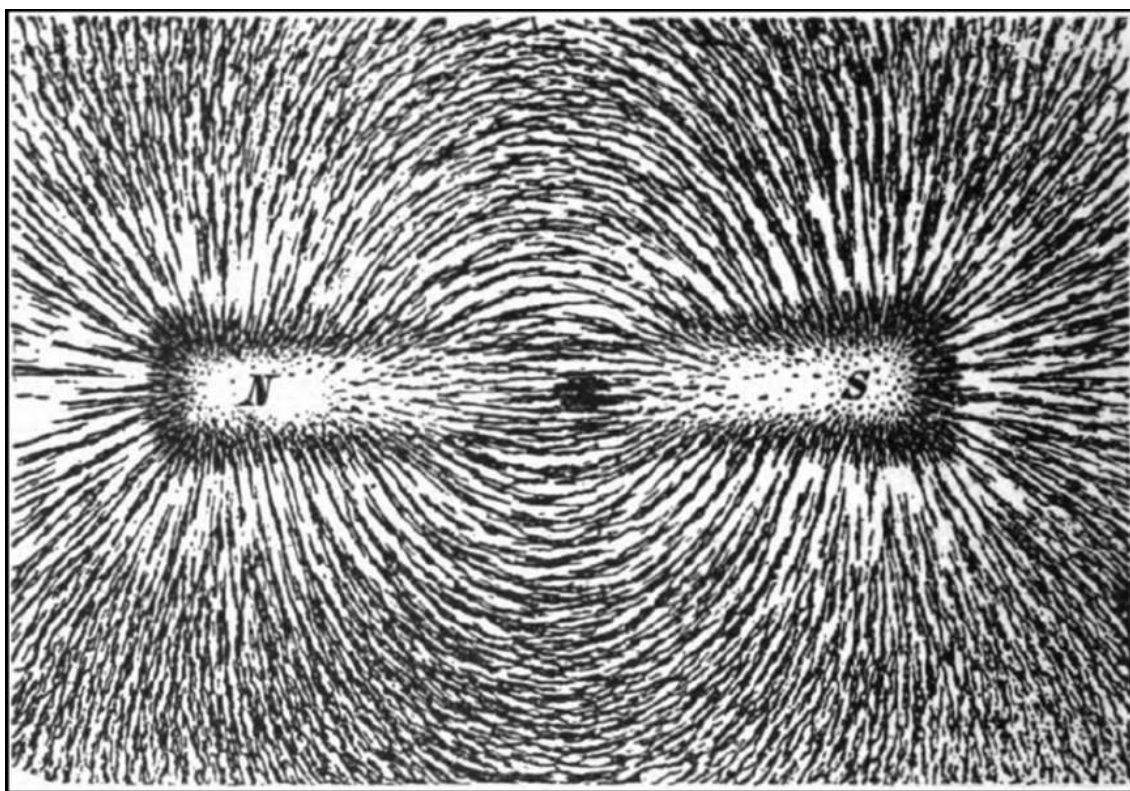
Figura 7.2 Limatura di ferro disposta attorno a un magnete a barra. Immagine tratta da Henry Black e Harvey N. Davis, “Practical Physics”, Macmillan, New York 1913, p. 242, Figura 200.

Per molti scienziati, questo significava che la limatura veniva orientata e raggruppata dal flusso del misterioso liquido magnetico. Faraday vide invece nella distribuzione della limatura di ferro qualcosa di più pratico: un mezzo per quantificare la direzione e l’intensità della forza magnetica intorno a un magnete. Nelle 28 parti della sua serie di articoli sull’elettricità e il magnetismo, presentò la sua idea delle linee di forza magnetica con queste parole: “Una linea di forza magnetica può essere definita come quella linea che è descritta da un minuscolo ago magnetico, quando viene spostato in una direzione o nell’altra corrispondente alla sua lunghezza, in modo che l’ago sia costantemente tangente alla linea di movimento”[10]. In altre parole, immaginò che un magnete fosse circondato da linee di forza rilevabili

in qualsiasi punto collocando un singolo pezzo di limatura di ferro in quella posizione. Chiamava poi campo magnetico l'insieme di tutte le linee. Anche un campo elettrico per un insieme di cariche elettriche può essere definito utilizzando una singola carica elettrica puntiforme, chiamata carica di test; le linee di campo puntano nella direzione verso cui la carica di test è spinta o tirata, quando è collocata nelle vicinanze dell'insieme.

Oggi i fisici possono calcolare facilmente come si presentano i campi per sistemi semplici. Un magnete a barra ha linee di forza che vanno dal polo nord al polo sud e viceversa. Un filo molto lungo che trasporti corrente elettrica produce un campo magnetico, come aveva mostrato Oersted, che circola attorno al filo. Una carica elettrica puntiforme produce linee di forza che se ne allontanano direttamente se la carica è positiva e si rivolgono invece verso di essa se è negativa.

I disegni dei campi mostrano solo un piccolo numero di linee, ma in linea di principio tutto lo spazio è riempito da un numero infinito di linee. I disegni danno solo un'idea del comportamento di magneti e cariche elettriche. Faraday però notava anche che queste immagini hanno una implicazione quantitativa: l'intensità della forza è direttamente proporzionale alla densità delle linee di campo in quel punto dello spazio. Quando ci si allontana dalla sorgente del campo, le linee diventano meno dense e le forze corrispondentemente meno intense.

Faraday era molto attento a precisare che intendeva la sua idea delle linee di forza come uno strumento concettuale e non come una spiegazione fisica di elettricità e magnetismo. Scrisse: "Desidero restringere il significato del termine *linea di forza*, in modo che non implichi altro che la condizione della forza in ogni dato punto, per quanto riguarda intensità e direzione; senza comportare (al presente) alcuna idea della natura della causa fisica dei fenomeni; o che sia

collegata, o in qualche modo dipendente da una tale idea"[11]. La costruzione di Faraday ebbe però come risultato un cambiamento filosofico molto importante, addirittura cruciale, nel modo in cui i ricercatori consideravano quelle forze: sostituiva in modo naturale l'idea di azione a distanza con una causa intermedia per l'attrazione o la repulsione degli oggetti. Diventava ragionevole, per esempio, pensare che un magnete producesse un campo magnetico e che il campo magnetico a sua volta esercitasse un'attrazione su un altro magnete. Invece di dire "Il magnete A attrae il magnete B, e viceversa", diventava sensato dire "Il magnete A produce il campo A, che interagisce con il magnete B e causa un'attrazione, e viceversa". L'azione a distanza era sostituita dall'idea che gli oggetti interagiscano mediante i campi che producono. Questa idea dei campi ora costituisce una parte fondamentale della nostra descrizione di tutte le forze fondamentali in natura.

Con la descrizione di Faraday, fenomeni che venivano descritti in termini un po' goffi con il linguaggio precedente ora potevano essere descritti con maggiore eleganza. L'induzione di Faraday, per esempio, può essere descritta così: "un campo magnetico variabile nel tempo induce un campo elettrico circolante". Se si colloca un anello di filo in quel campo elettrico, il campo provoca una corrente elettrica.

La descrizione di Faraday delle linee di forza e dei campi non ricevette immediatamente molta attenzione. Faraday stesso non aveva una formazione matematica, e le sue descrizioni non riuscirono a convincere i fisici teorici dell'epoca dell'utilità dei suoi concetti. Ci sarebbe voluto quasi un decennio prima che un brillante scienziato scozzese, James Clerk Maxwell, si rendesse conto della potenza e dell'utilità delle idee di Faraday.

James Clerk Maxwell era nato a Edimburgo, in Scozia, nel 1831, da famiglia di buone condizioni economiche. Come Young, dimostrò già

in tenera età la propria notevole intelligenza e curiosità. A tre anni, voleva conoscere il funzionamento di ogni cosa. Chiedeva: “Come è che funziona? Che cosa fa?”, per poi continuare con: “Ma com’è in particolare che funziona?”, se la risposta iniziale era troppo vaga. Facendo presagire il suo futuro percorso, il giovane Maxwell era affascinato anche dai colori e dalla loro origine; una volta che gli era stato detto che una pietra era di colore blu, chiese: “Ma come fai a sapere che è blu?”[12].

La madre, Frances, seguì la sua istruzione finché non morì prematuramente quando Maxwell aveva solo otto anni. Del resto della sua prima istruzione si incaricarono il padre e una zia. Nel febbraio 1842, il padre lo portò a una dimostrazione pubblica di macchine elettromagnetiche, fra cui un piccolo treno elettrico e una sega elettrica; con ogni probabilità quella dimostrazione ebbe un forte influsso sui futuri interessi del giovane Maxwell[13].

La carriera e i talenti di Maxwell si svilupparono a velocità incredibile. Scrisse il suo primo articolo scientifico, “On the Description of Oval Curves and Those Having a Plurality of Foci” a quattordici anni[14]. Fu presentato alla Royal Society di Edimburgo dal professor James Forbes dell’Università di Edimburgo; Maxwell era considerato troppo giovane per presentarla personalmente. A sedici anni, iniziò a seguire i corsi all’Università di Edimburgo; a diciannove, si trasferì a Cambridge, dove continuò gli studi al Trinity College, ottenendo una laurea in matematica nel 1854. Mentre era al Trinity College, studiò la percezione dei colori, che lo affascinavano da quando era ancora un bambino. Nel 1855 presentò alla Cambridge Philosophical Society un articolo, “Experiments on Colour”, in cui descriveva i principi della combinazione dei colori: per la prima volta, fu in grado di presentarlo personalmente[15]. Verso la fine del 1855 accettò un incarico di insegnamento al Trinity College e, alla fine del

1856, una cattedra di filosofia naturale al Marschal College di Aberdeen: aveva solo 25 anni.

Incredibilmente, si ritrovò senza lavoro dopo solo pochi anni, quando l'Università di Aberdeen si fuse con il King's College of Aberdeen nel 1860. Si trasferì allora a Londra con la moglie Katherine e ottenne una cattedra al King's College londinese. A Londra portò a termine alcune delle sue ricerche più rivoluzionarie, fra cui quella che lo condusse a creare uno dei primi metodi per scattare fotografie a colori. Frequentò anche le lezioni di Michael Faraday, che, ormai superati i 70 anni, continuava a lavorare alla Royal Institution.

Maxwell si era interessato già all'idea delle "linee di forza" di Faraday e nel 1855 aveva scritto un articolo in cui sollecitava altri a prestarvi maggiore attenzione[16]. I ricercatori avevano trattato il lavoro di Faraday come una descrizione non rigorosa delle forze elettriche e magnetiche, puramente un ausilio visuale, ma Maxwell sostenne che i concetti di linee di forza e di campo potevano essere resi matematicamente rigorosi.

Maxwell raggiunse i risultati più spettacolari con un saggio in quattro parti, "On Physical Lines of Force", pubblicato nel 1861. Nella prima parte assunse una posizione coraggiosa, ipotizzando che le linee di forza introdotte da Faraday non fossero solo un puro costrutto matematico, ma un fenomeno reale. L'esperimento del magnete e della limatura di ferro era ancora una giustificazione forte: "La bella illustrazione della presenza di una forza magnetica presentata da questo esperimento tende naturalmente a farci pensare che le linee di forza siano qualcosa di reale e che indichino qualcosa di più della semplice risultante di due forze, la cui sede è a distanza, e che non esiste affatto in quel punto finché in quella parte del campo non viene collocato un magnete"[17]. Cosa ancora più importante, Maxwell si rese conto che mancava qualcosa nelle descrizioni esistenti dei fenomeni

elettrici e magnetici, considerando che Oersted e Faraday avevano già dimostrato che elettricità e magnetismo erano in relazione fra loro. Possiamo formulare l'idea di Maxwell in questo modo: se un campo magnetico variabile nel tempo produce un campo elettrico circolante, come ha mostrato Faraday, non dovrebbe anche accadere che un campo elettrico variabile nel tempo produca un *campo magnetico* circolante? Maxwell notava che un campo elettrico variabile nel tempo avrebbe agito in modo molto simile a una corrente elettrica, e chiamò quei campi variabili nel tempo correnti di spostamento: producono magnetismo come una corrente ordinaria, come aveva mostrato Oersted, ma senza la presenza di alcuna carica elettrica.

Il risultato più importante presentato nell'articolo di Maxwell, però, derivava dal trattare elettricità e magnetismo come perturbazioni di un ipotetico supporto materiale, indicato come etere. Analizzando la velocità a cui le onde si sarebbero propagate in quel mezzo, Maxwell scoprì che era notevolmente vicina alla velocità nota della luce. Ne concludeva: "È difficile evitare di inferirne che *la luce è costituita da ondulazioni trasversali dello stesso mezzo che è la causa dei fenomeni elettrici e magnetici*"[18]. In altre parole: quella che percepiamo come luce è, di fatto, un'onda trasversale costituita da campi elettrici e magnetici oscillanti. Maxwell aveva ipotizzato ufficialmente l'unità di elettricità, magnetismo e luce, come fenomeno singolo – quello che noi oggi chiamiamo elettromagnetismo.

Solo pochi anni dopo, nel 1865. Maxwell avrebbe pubblicato una descrizione matematica perfezionata di tutti i fenomeni elettrici e magnetici e mostrato che quelle equazioni, una volta inclusa la corrente di spostamento, hanno chiaramente come risultato un'equazione d'onda che prevede per le onde una velocità uguale a quella della luce[19]. Questa scoperta ha segnato l'inizio della scienza ottica moderna e le equazioni introdotte ora sono note come equazioni

di Maxwell. Sono utilizzate ancora oggi dai ricercatori, che hanno cambiato la notazione ma non il loro contenuto.

Oggi, utilizzando le linee di campo di Faraday e gli strumenti matematici di Maxwell, abbiamo un'idea chiara di "quale aspetto ha" un'onda elettromagnetica: è costituita da un campo elettrico e magnetico oscillanti, perpendicolari fra loro ed entrambi perpendicolari alla direzione in cui si propaga l'onda, alla velocità della luce (Figura 7.3).
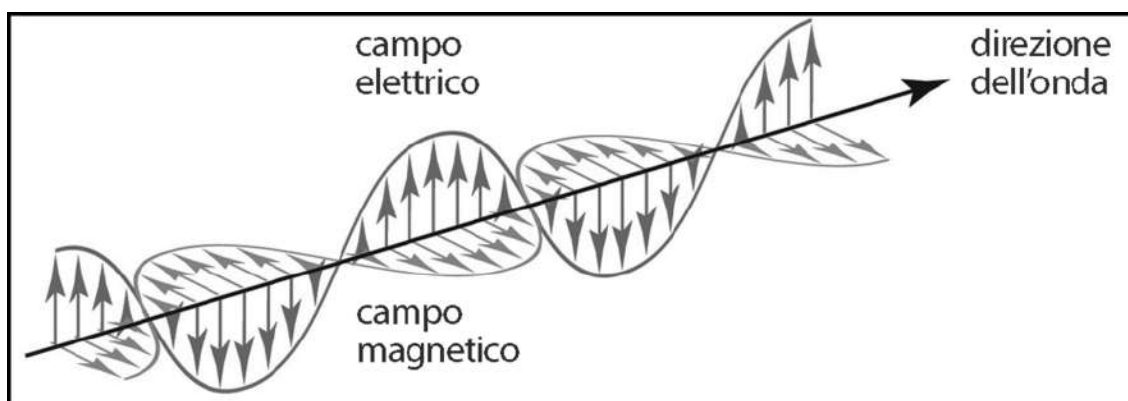
Figura 7.3 Un'onda elettromagnetica. Il campo elettrico e quello magnetico sono fra loro perpendicolari ed entrambi oscillano trasversalmente rispetto alla direzione lungo la quale si propaga l'onda. Si tratta di un'onda trasversa.

Come si forma un'onda elettromagnetica a partire dai fenomeni distinti di elettricità e magnetismo? Lo si può capire approssimativamente dall'induzione di Faraday e dalla corrente di spostamento di Maxwell. La legge di Faraday dice che un campo magnetico variabile crea un campo elettrico, e la corrente di spostamento di Maxwell indica che un campo elettrico variabile produce un campo magnetico. Una volta creati, quindi, questi campi magnetico ed elettrico si mantengono a vicenda oscillanti nel tempo, producendo un'onda che può percorrere grandi distanze. Il processo può essere avviato da un'antenna che genera una corrente elettrica oscillante, la quale a sua volta produce un campo magnetico oscillante,

come aveva mostrato Oersted. Questo è il meccanismo grazie al quale le antenne radio e i telefoni cellulari trasmettono segnali in broadcast.

Anche se Faraday non era stato un matematico, Maxwell gli attribuì un merito enorme nello sviluppo delle proprie scoperte teoriche. Nel suo *Trattato sull'elettricità e il magnetismo* (1873) scrisse con affetto di Faraday e dei risultati che aveva ottenuto.

> Man mano procedevo nello studio di Faraday, mi rendevo conto che il suo metodo di concepire i fenomeni era anche di tipo matematico, sebbene non si esprimesse nella forma convenzionale dei simboli matematici. Mi resi anche conto che tali metodi potevano essere espressi nel comune linguaggio matematico, ed essere così paragonati con quelli dei matematici di professione.
>
> Per esempio, Faraday aveva visto con gli occhi della mente linee di forza che attraversano tutto lo spazio, dove i matematici vedevano centri di forza che attraggono a distanza; Faraday vedeva un mezzo, dove quelli non vedevano altro che distanze. Faraday cercava la base dei fenomeni in vere e proprie azioni che si svolgono nel mezzo, mentre quelli si accontentavano di averla trovata in un potere di azione a distanza esercitata sui fluidi elettrici.[20]

Maxwell aveva mostrato sul piano teorico che le onde elettromagnetiche esistono e che viaggiano alla velocità della luce, ma servivano verifiche sperimentali. Gli esperimenti fondamentali furono condotti dal fisico tedesco Heinrich Hertz fra il 1886 e il 1889 utilizzando quelli che oggi noi definiremmo un rozzo trasmettitore di onde radio e un altrettanto rozzo ricevitore[21]. Con uno specchio rifletteva le onde radio verso la sorgente, creando onde stazionarie, come le onde acustiche prodotte in una canna d'organo. Misurandone la lunghezza d'onda (circa 9,3 metri) e la frequenza, poté calcolare la velocità delle onde e confermare che, nei limiti dell'errore sperimentale, era uguale alla velocità della luce. Hertz aveva dimostrato perciò che le onde elettromagnetiche esistono e che viaggiano alla velocità della luce; dopo di questo, pochi scienziati dubitavano che la luce stessa fosse un'onda elettromagnetica.

Si racconta spesso un aneddoto. Uno dei suoi studenti gli chiese per che cosa potesse essere utilizzata la sua scoperta e Hertz rispose: "Per

nulla, penso”[22]. Che sia vero o no, l’episodio è comunque particolarmente divertente, visto quanto quella previsione si è dimostrata errata. Solo nel giro di pochi anni, Guglielmo Marconi e Nikola Tesla iniziarono a sviluppare le comunicazioni radio, aprendo una nuova era tecnologica e, di conseguenza, enormi cambiamenti nella società.

Da un punto di vista scientifico, la scoperta e la conferma dell’esistenza delle onde elettromagnetiche ha prodotto una migliore comprensione della luce e di quello che può e non può fare. Per la scienza dell’invisibilità, sul breve termine il risultato sarebbe stato che gli autori di narrativa avrebbero partorito idee più raffinate del possibile funzionamento dell’invisibilità, idee che non fossero in conflitto con le nuove conoscenze. Per fortuna, un autore in particolare fu all’altezza della sfida, e avrebbe scritto alcuni dei racconti di fantascienza più belli di tutti i tempi.

---

1 Young, *Course of Lectures on Natural Philosophy*, p. 460.

2 Potete realizzare questo esperimento in casa, con una taglierina a filo caldo per polistirolo, che si può acquistare nei negozi per il fai-da-te. Nel filo passa una corrente continua che, quando attiva, farà deviare l’ago di una bussola nelle vicinanze.

3 Oersted, “Thermo-Electricity”, p. 717.

4 Oersted, “Experiments on Effect of Current”.

5 Jones, *Life and Letters of Faraday*, vol. 1, p. 55.

6 Ivi, p. 54. [La lettera è citata, tradotta in italiano, nell’Introduzione a M. Faraday, *Storia chimica di una candela*, Treves, Milano, 1872, p. 10.]

7 Hirshfeld, *Electric Life of Faraday*, p. 53.

8 Faraday, “V. Experimental Researches in Electricity”.

9 Jones, *Life and Letters of Faraday*, vol. 2, p. 401.

10 Faraday, “III. Experimental Researches in Electricity; Twenty-Eighth Series”, p. 25.

11 Ivi, p. 26.

12 Campbell e Garnett, *Life of Maxwell*, p. 28.

13 Anderson, “Forces of Inspiration”.

14 Maxwell e Forbes, “On the Description of Oval Curves”.

15 Maxwell, “XVIII. Experiments on Colour”.

16 Maxwell, “Faraday’s Lines of Force”.

17 Maxwell, “XXV. On Physical Lines of Force”, pp. 161-162.

18 Maxwell, “III. On Physical Lines of Force”, p. 22.

19 Maxwell, “Dynamical Theory of the Electromagnetic Field”.

20 Maxwell, *Treatise on Electricity and Magnetism,* ix [trad. it. p. 132].

21 Hertz, *Electric Waves*, pp. 95-106.

22 DeVito, *Science, SETI, and Mathematics*, p. 49.

Capitolo 8

Onde e Wells

> Nell'esperimento successivo, e in quelli seguenti, lasciò che i suoi agenti chimici agissero più profondamente sui tessuti del mio corpo. Divenni non solo bianco, come un uomo sbiancato, ma leggermente traslucido, come una statuina di porcellana. Poi si fermò di nuovo per un po', restituendomi il mio colore e consentendomi di ripresentarmi nel mondo. Due mesi dopo ero più che traslucido. Avete visto quegli animali marini, come le meduse, con i loro contorni pressoché invisibili all'occhio. Beh, diventavo nell'aria come una medusa nell'acqua.
> – Edward Page Mitchell, *The Crystal Man* (1881)

Il diciannovesimo secolo è stato ricco di rivelazioni sulla natura della luce, dell'elettricità e del magnetismo, ma ha risparmiato un'ultima sorpresa per i suoi ultimi anni: una nuova, misteriosa forma di radiazione, invisibile a occhio nudo, in grado di penetrare tutti i materiali, tranne i più densi, come se fossero invisibili. Quei raggi, inizialmente chiamati con il nome del loro scopritore, con sua irritazione, raggi Röntgen, alla fine hanno preso il nome che preferiva e che ne indicava la natura misteriosa: raggi X. Quei raggi X non solo avrebbero rivoluzionato la scienza e la medicina, ma avrebbero anche fornito a H.G. Wells l'ispirazione per il suo romanzo più famoso sull'invisibilità scientifica, *L'uomo invisibile*.

La scoperta epocale dei raggi X fu possibile solo grazie alla scoperta, decenni prima, di un altro tipo di raggio misterioso. Le radici di questa precedente scoperta possono essere fatte risalire, cosa che non sorprende più di tanto, a Michael Faraday. Nel 1838, Faraday stava studiando la produzione di scintille elettriche nello spazio fra

superfici metalliche, mediante un dispositivo elettrico che produceva una carica negativa su una superficie (quello che poi sarebbe stato chiamato il catodo) e una positiva sull'altra (l'anodo). Era particolarmente interessato a vedere come cambiasse il comportamento della scintilla quando veniva prodotta in gas diversi, e collocò tutto il suo apparato in una campana di vetro che poteva riempire di gas o in cui, in alternativa, poteva creare un vuoto parziale. Scoprì che, in determinate circostanze, non si generava alcuna scintilla ma si formavano colonne luminescenti un po' spettrali, che si estendevano dal catodo verso l'anodo e viceversa. Faraday non era in grado di darne una spiegazione, ma in seguito si capì che il fenomeno derivava dal fatto che gli elettroni che fluivano dal catodo verso l'anodo andavano a collidere con gli atomi. Nelle collisioni, gli elettroni trasferiscono energia agli atomi; quell'energia poi viene riemessa come luce.

Nel 1857, un soffiatore di vetro tedesco, Heinrich Geissler, riuscì a generare un vuoto migliore in un tubo, con una minore densità di gas all'interno, e scoprì che poteva far brillare tutto l'interno del tubo utilizzando l'elettricità. (Questa tecnica è sostanzialmente quella alla base delle insegne al neon di oggi; ovviamente, sono piene di gas neon.) Un dipendente di Geissler, Julius Plücker, continuò a lavorare sui tubi di Geissler l'anno successivo e scoprì che, facendo fuoriuscire dal tubo ancora più gas, poteva rendere fluorescente la parete del tubo opposta al catodo. Plücker mise un magnete vicino alla parete fluorescente e scoprì che poteva distorcere la forma della fluorescenza. Poiché le correnti elettriche sono influenzate da un campo magnetico, l'osservazione di Plücker faceva pensare che la fluorescenza della parete del tubo fosse provocata da qualche tipo di disturbo elettrico in movimento.

Nel 1869 Johann Hittorf, allievo di Plücker, ottenne un vuoto ancora più spinto all'interno di un tubo di Geissler e dimostrò che gli oggetti collocati nel tubo gettavano un'ombra sulla parete fluorescente. Questo fece pensare che l'elettricità venisse trasportata da qualche tipo di raggio, come si pensava un tempo della luce, che viaggia in linea retta dal catodo all'anodo del tubo. Così, i misteriosi raggi furono chiamati raggi catodici (Figura 8.1).

La storia si è ripetuta e gli scienziati hanno cominciato a discutere: i raggi catodici sono onde o particelle? Gli scienziati francesi e inglesi tendevano a pensare che fossero particelle, mentre quelli tedeschi erano convinti che fossero onde. I raggi catodici furono ampiamente studiati e furono argomento di dibattiti accesi per il resto del secolo. Nel 1897, il lavoro del fisico inglese J.J. Thomson ha posto fine al dibattito. Utilizzando campi elettrici e magnetici, Thomson fu in grado di stabilire il rapporto fra carica elettrica e massa dei misteriosi raggi catodici, mostrando che sono costituiti da un flusso di particelle identiche di carica negativa e massa molto piccola. Questo fu il primo "mattone fondamentale" della natura scoperto, e fu chiamato elettrone.
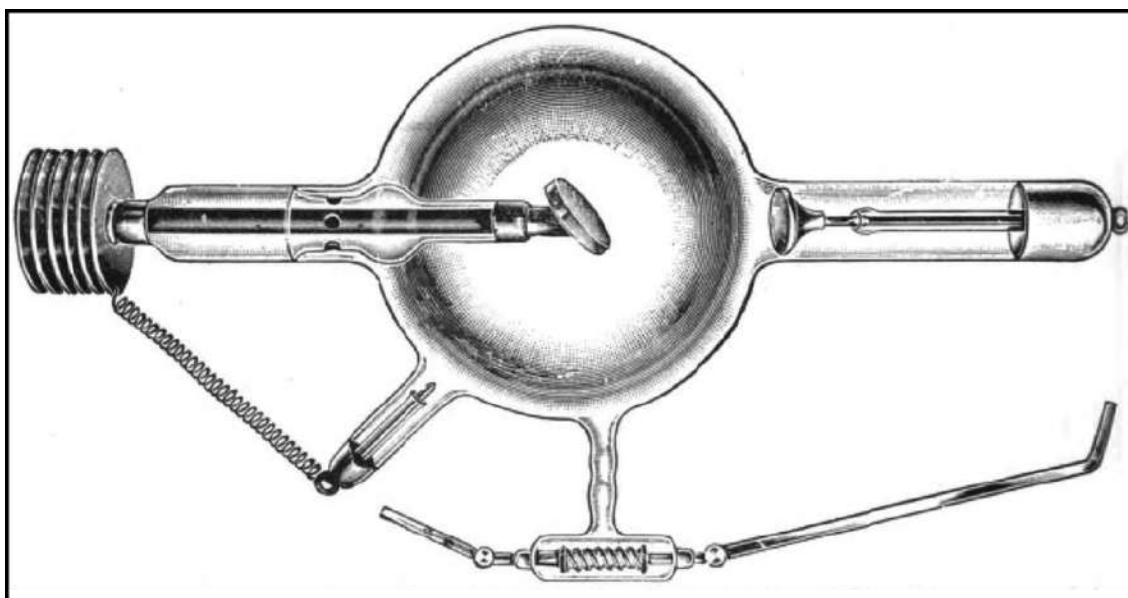
Figura 8.1 Un tubo di Cossor, un modello perfezionato di tubo a raggi catodici utilizzato per produrre raggi X. Il catodo è a destra; il centro del tubo è l'"anticatodo", che sostituiva l'anodo nei tubi a raggi X. Per stabilizzare il funzionamento del tubo, era incluso un anodo secondario, a sinistra in basso. Illustrazione tratta da Kaye, "X Rays", 1918.

Due anni prima della scoperta epocale di Thomson, un cinquantenne professore di fisica all'Università di Würzburg, Wilhelm Conrad Röntgen, stava studiando le proprietà dei raggi catodici. Altri ricercatori avevano già dimostrato che i raggi catodici possono passare attraverso una "finestra" di alluminio collocata su un tubo a raggi catodici; se questi raggi andavano a colpire uno schermo rivestito di vernice fluorescente, potevano farlo brillare. Röntgen era interessato a stabilire se i raggi catodici potevano passare anche attraverso il vetro di un tubo privo di finestra.

Nel preparare i suoi esperimenti, avvolse il tubo a raggi catodi in cartone per non far sfuggire la luce; voleva essere sicuro che quella che vedeva venisse dalla fluorescenza dello schermo e non dalla familiare luminescenza del tubo. L'8 novembre 1895, mentre metteva alla prova il tubo avvolto nel cartone in una stanza buia, notò che uno

schermo fluorescente a una certa distanza brillava. Non poteva dipendere dai raggi catodici, che già si sapeva possono percorrere solo pochi centimetri nell'aria: qualche altro tipo di raggio misterioso non solo passava attraverso il vetro del tubo e il cartone di rivestimento, ma percorreva distanze nell'aria e comunque eccitava la fluorescenza. Röntgen chiamò "raggi X" quei nuovi raggi misteriosi.

Fu subito evidente la straordinaria caratteristica di questi raggi: riuscivano chiaramente a passare attraverso pressoché qualsiasi sostanza. Röntgen si rese presto conto del loro potenziale, per ottenere immagini dell'interno del corpo umano e, nel primo saggio che pubblicò in proposito, incluse un'immagine a raggi X della mano della moglie, ottenuta il 22 dicembre 1895 (Figura 8.2)[1]. Quando sua moglie vide l'immagine, si tramanda abbia detto: "Ho visto la mia morte".

Figura 8.2 "Ho visto la mia morte!" Una stampa della mano della moglie di Röntgen, ottenuta con i raggi X.

L'importanza del lavoro di Röntgen per la medicina fu immediatamente ovvia. Il suo saggio fu pubblicato il 28 dicembre 1895 e il primo resoconto della sua scoperta fu pubblicato sulla *Presse* di Vienna l'8 gennaio 1896. Secondo l'articolo della *Presse*, "Il chirurgo potrebbe quindi stabilire l'estensione di una frattura complicata senza l'esame manuale che è tanto doloroso per il paziente;

potrebbe individuare la posizione di un corpo estraneo come una pallottola o un frammento di granata molto più facilmente di quanto fosse possibile in precedenza e senza alcun esame doloroso con una sonda”[2].

Ma che cosa erano questi nuovi raggi X? Gli studi iniziati mostravano che possedevano numerose caratteristiche sconcertanti. Non subivano riflessione o rifrazione come la luce ordinaria o altri raggi invisibili come quelli infrarossi e ultravioletti. Alla fine, però, si è stabilito che si trattava di un altro tipo di onda elettromagnetica, con una lunghezza d’onda molto più corta di quella della luce visibile. Mentre la luce visibile ha una lunghezza d’onda nell’ordine dei 500 nanometri (miliardesimi di metro), i raggi X hanno lunghezza d’onda *al massimo* di 10 nanometri. L’energia dei raggi X è tanto elevata che possono passare attraverso la maggior parte degli oggetti come se questi nemmeno esistessero, il che ne determina le incredibili caratteristiche per la generazione di immagini.

Come si creano i raggi X? In seguito, si sarebbe scoperto che sono generati da una versione estrema dello stesso processo che produce tutta la radiazione elettromagnetica, cioè l’accelerazione di cariche elettriche. È una conseguenza delle equazioni di Maxwell: quando una carica elettrica subisce un’accelerazione, produce un campo elettrico e magnetico variabile e il risultato è un’onda elettromagnetica. I raggi X sono generati dalle accelerazioni estreme degli elettroni in un tubo a raggi catodici. Quando l’elettrone esce dal catodo, la sua velocità aumenta mentre si avvicina all’anodo a carica positiva. In un tubo a vuoto, non è presente gas che possa rallentare gli elettroni, che quindi entrano in collisione con l’anodo a velocità tremende[3]. Nella collisione l’elettrone subisce una decelerazione rapida, che produce un raggio X ad alta energia.

Al tempo della loro scoperta, i raggi X di Röntgen suscitarono un grande interesse a livello internazionale, sia nei circoli scientifici sia fra il pubblico in generale. La disinformazione si diffuse quasi con la stessa rapidità della notizia della scoperta stessa: se i raggi X possono vedere dietro qualunque cosa, le persone avrebbero potuto utilizzarli per spiare i loro vicini e vedere sotto i loro vestiti? Un articolo di giornale che smentiva queste affermazioni notava che "un uomo intraprendente a Londra ha persino pubblicizzato biancheria intima a prova di raggi X" (Figura 8.3)[4].

Non è difficile vedere come i raggi X siano stati immediatamente associati all'invisibilità. I raggi stessi erano invisibili e potevano effettivamente rendere a loro volta invisibili altre cose, come il corpo umano. Questa possibilità colpì la fantasia di un giornalista scientifico che si chiamava H.G. Wells, che avrebbe trasformato le sue conoscenze scientifiche, mescolate alle idee popolari sui raggi X, in uno dei racconti di fantascienza più famosi di tutti i tempi.

Figura 8.3 “Un uomo intraprendente a Londra ha persino pubblicizzato biancheria intima a prova di raggi X.” Illustrazione dal “Courier-News” di Bridgewater, N.J., del 27 maggio 1896. In qualche modo, i raggi X riescono a dare un’immagine dell’uomo con la mano destra alzata, anche se la tiene appoggiata al fianco.

Herbert George Wells nacque nel 1866 a Bromley, nella zona sud-orientale di Londra. La sua famiglia aveva problemi finanziari: la madre lavorava come commessa e il padre aveva un reddito irregolare come giocatore professionista di cricket. Wells ebbe difficoltà per gran

parte dell'età di giovane adulto, a volte patì la fame; queste esperienze lo avrebbero motivato in seguito a promuovere una società equa, addirittura utopica.

La vita e la carriera futura di Wells, ironicamente, furono trasformate per il meglio dalla cattiva sorte. Nel 1874, quando aveva sette o otto anni, si ruppe una gamba mentre litigava con un ragazzo più grande. Mentre era a letto convalescente, iniziò a leggere e scoprì di amare profondamente i libri. Durante la convalescenza veniva rifornito regolarmente di nuovi materiali di lettura dal proprio padre e dalla madre, animata dai sensi di colpa, del ragazzo che senza volerlo lo aveva colpito. Wells dava a questo incidente il merito della sua carriera futura, e in seguito avrebbe detto: "Probabilmente oggi sono vivo e scrivo questa autobiografia invece di essere un commesso esaurito, licenziato e già morto perché ho avuto una gamba rotta"[5].

La sua prima istruzione fu irta di difficoltà e delusioni. Dopo essere guarito dall'incidente alla gamba, iniziò a frequentare un'accademia privata gestita da Thomas Morley. Morley era un insegnante poco motivante; pretendeva che gli studenti memorizzassero a pappagallo, aveva un umore instabile, trattava male gli allievi e spesso non conosceva le materie che insegnava. Ironicamente avrebbe ricordato: "È molto difficile presentare qualsiasi fatto su questo pastore e la sua Accademia in un modo che non sembri una caricatura dickensiana"[6]. Nel 1877, il padre di Wells si ruppe seriamente una gamba, il che mise fine alla sua carriera di giocatore di cricket e intaccò pesantemente il reddito familiare. Wells passò attraverso vari apprendistati, due volte come tappezziere e una come preparatore chimico. Considerava il tempo passato come tappezziere il più miserevole della sua vita. Infine, nel 1883, convinse i genitori a fargli lasciare il lavoro di tappezziere, arrivando all'estremo di minacciare il suicidio se non otteneva ciò che desiderava, e trovò lavoro come allievo-insegnante,

uno studente che aiuta nell’insegnamento agli studenti più giovani, presso la Midhurst Grammar School.

Il lavoro a Midhurst offrì finalmente a Wells l’opportunità di studiare a fondo gli argomenti che desiderava, e si immerse in ogni disciplina scientifica immaginabile. Uno dei suoi insegnanti, Horace Byatt, preparava per lui addirittura dei finti corsi, sostanzialmente delle ore di studio individuale, che erano semplicemente occasioni per leggere tutto quello che voleva. Durante quelle ore, Byatt attendeva alla sua corrispondenza personale. L’impegno fu ripagato: i voti di Wells agli esami furono tanto buoni da fargli ottenere una borsa di studio per la Normal School of Science (poi diventata Royal College of Science) dopo un solo anno passato a Midhurst. Poté così studiare biologia con Thomas Henry Huxley, famoso come “il mastino di Darwin” per la sua accanita difesa pubblica della teoria dell’evoluzione di Charles Darwin. Wells ebbe un’istruzione meno soddisfacente in fisica; aveva l’impressione che il suo stesso insegnante non capisse bene l’argomento. A posteriori, Wells ebbe l’impressione che fosse una sorta di presagio: “Allora non me ne rendevo conto, ma a quell’epoca la scienza della fisica era in uno stato di confusione e di ricostruzione, e non esistevano esposizioni lucide delle nuove idee, per gli studenti e per il pubblico in generale”[7].

Nel 1887 lasciò la Normal School e trovò impiego come insegnante alla Holt Academy nel Galles. Era ottimista e pensava che avrebbe trovato una sistemazione accettabile, ma quando arrivò all’accademia trovò un luogo triste e demotivante, al punto da temere di essere finito in un “cul-de-sac”. Ancora una volta, la sfortuna avrebbe cambiato in meglio il suo destino. Mentre giocava a calcio, subì un fallo pesante da parte di un altro giocatore. Finì per stare male, costretto a letto; i medici conclusero che l’infortunio aveva rovinato uno dei suoi reni. Cosa ancora più preoccupante, Wells iniziò a sputare sangue, e i

medici gli diagnosticarono una forma grave di tubercolosi. La diagnosi però consentì a Wells di ottenere un congedo retribuito e tornò a casa per stare con la madre e aspettare il compiersi del destino.

Un medico, che si chiamava Collins, viveva nella stessa casa e iniziò a curare Wells. Si rifiutava di accettare una diagnosi di tubercolosi e lo curò con molta attenzione, tanto che Wells lentamente iniziò a riprendersi. Mentre era convalescente, cominciò a scrivere molto, affrontando ogni genere che gli era noto: racconti brevi, saggi brevi, poesia. Dopo vari mesi, riguardando quelle sue prime prove, le bruciò tutte e ricominciò da capo, cercando di migliorare il proprio stile. Nel frattempo le sue condizioni miglioravano, sia pure lentamente. Infine, nell'estate del 1888, prese una decisione importante.

> Un pomeriggio di sole uscii da solo e mi recai in una piccola area boscata in mezzo al paese industrializzato, che si chiamava "Trury Woods". C'era stata una grande fioritura di giacinti selvatici quell'anno e mi sono sdraiato in mezzo ai fiori a pensare. Era uno di quei pomeriggi assolati che sono pieni di vitalità. Quei giacinti nella loro moltitudine eran più coraggiosi di un esercito con le sue bandiere e più incoraggianti di trombe.
> "Ho continuato a morire per quasi due terzi di un anno", mi sono detto, "e sono morto abbastanza".
> In quel preciso momento ho smesso di morire e, nonostante qualche momento negativo, da allora non sono mai morto.[8]

Wells tornò a Londra, per cercare di intraprendere una carriera di scrittore, ma non era una cosa facile. Per pagare le bollette accettò nuovamente un lavoro come insegnante e nel 1890 riuscì addirittura a ottenere una laurea in zoologia dall'University of London External Programme. Una ricaduta verso la fine del 1890 gli diede il tempo di provare a scrivere di scienza per un pubblico generale, e i risultati furono variabili. Dopo che il suo primo articolo, "The Rediscovery of the Unique", fu pubblicato nella *Fortnightly Review*, ne presentò un secondo dal titolo "The Universe Rigid," che cercava di descrivere in termini non tecnici i principi dello spazio-tempo quadridimensionale.

W.E. Henley, il direttore della rivista, quando lesse le bozze dell'articolo, rimase tanto irritato per la sua incomprensibilità da convocare personalmente Wells nel suo ufficio e mettersi a gridare: "Prese una bozza che aveva vicino e là lanciò attraverso il tavolo. 'Buon Dio! Non riesco a capire sei parole. Che cosa significa? Mi dica, di che cosa sta parlando? Qual è il senso? Che cosa sta cercando di dire?'"[9].

Wells si impegnò a perfezionare la propria scrittura e si dedicò ad argomenti meno complessi; così nel 1894 scriveva regolarmente per la *Pall Mall Gazette*, e riusciva a guadagnare più di quanto avesse mai guadagnato insegnando. Nel 1895, la *Gazette* cercava contributi più lunghi, da pubblicare a puntate, e Wells propose una serie di articoli sulla possibilità dei viaggi nel tempo, su cui aveva riflettuto e scritto in un breve racconto per il giornale del college, con il titolo "The Chronic Argonauts" ["Gli argonauti del tempo"]. Il suo racconto fu pubblicato a puntate sulla "New Review" fra gennaio e maggio 1895 con il titolo, oggi più familiare e famoso, di *The Time Machine* [*La macchina del tempo*]. A quel punto, il direttore della *New Review* era W.E. Henley, lo stesso che anni prima aveva bocciato gli incomprensibili tentativi di divulgazione scientifica di Wells. Nonostante la precedente frustrazione, chiaramente doveva essergli rimasto in mente qualcosa di positivo a proposito di Wells. Ironicamente, *La macchina del tempo* introduce l'idea del viaggio nella "quarta dimensione" del tempo, proprio il concetto che aveva confuso e irritato Henley in precedenza.

La macchina del tempo ebbe un grande successo e fu pubblicato in forma di libro nel maggio 1985. Da quel momento, la carriera di Wells come romanziere fu assicurata. Il successivo romanzo di fantascienza, pubblicato nel 1896, fu *The Island of Doctor Moreau* [*L'isola del dottor Moreau*], storia di uno scienziato che crea ibridi animali simili a esseri umani e delle conseguenze terribili che ne derivano. Il romanzo

seguente, pubblicato nel 1897, è probabilmente il suo più famoso: *The Invisible Man* [*L'uomo invisibile*] (Figura 8.4).

La trama è ben nota: Griffin, uno scienziato, scopre il segreto per rendere completamente invisibile una creatura vivente, e avventatamente prova il suo preparato su se stesso. I suoi vestiti però non diventano invisibili insieme al suo corpo, e Griffin scopre che l'invisibilità può essere una maledizione, non solo un vantaggio, perché è costretto a coprirsi dalla testa ai piedi quando è in pubblico e a svolgere qualsiasi missione clandestina nudo. La sua pazzia aumenta e Griffin cerca di convincere Kemp, un collega scienziato, ad aiutarlo a creare nella sua megalomania un regno del terrore nel paese e Kemp fa un tentativo disperato di fermarlo. Ma in che modo Griffin raggiunge l'invisibilità?

Figura 8.4 Pubblicità apparsa su rivista per l'edizione originale del romanzo di H.G. Wells, "L'uomo invisibile", del 1897. Il testo dell'annuncio pubblicitario recita: "Altri scrittori hanno trattato questo tema, ma in genere hanno attribuito all'uomo invisibile un potere che gli offre qualcosa più che una certa soddisfazione. Il signor Wells, invece, è originale in tutto e ci mostra in questo racconto quale svantaggio sia diventare invisibili. Descrive come, se un uomo diventa invisibile, non ne segua che diventino invisibili anche i vestiti che indossa, e in base a questo presupposto ha intrecciato una vicenda che terrà incollato il lettore con il fiato sospeso dall'inizio alla fine".

Ecco come spiega i dettagli a Kemp.

> Se rompiamo una lastra di vetro, Kemp, e la riduciamo in polvere, essa si muta in una polvere bianca opaca, e diviene molto più visibile. Questo accade perché, polverizzando il vetro, si moltiplicano le sue superfici sensibili alla rifrazione e alla riflessione. Una lastra di vetro ha soltanto due facce, invece nella sua polvere la luce si riflette e si rifrange in ogni granello che tocca. Molto poca luce, invece, passa tra la polvere. Ma se mettiamo nell'acqua del vetro bianco polverizzato, esso diventa invisibile. Poiché la polvere di vetro e l'acqua hanno pressappoco lo stesso indice di rifrazione, la luce subisce una rifrazione o una riflessione trascurabili passando dall'uno all'altro.
> Si può rendere invisibile il vetro immergendolo in un liquido che possegga quasi lo stesso indice di rifrazione: ogni oggetto trasparente diviene invisibile, se è messo in un *medium* che possegga presso a poco il suo stesso indice di rifrazione. Ci pensi un secondo, è vedrà anche che la polvere di vetro scomparirà nell'aria una volta che il suo indice di rifrazione sia reso simile a quello dell'aria; non vi sarà, infatti, né rifrazione né riflessione al passaggio della luce dal vetro all'aria.[10]

Qui troviamo in sostanza lo stesso tipo di spiegazione che Fitz-James O'Brien aveva utilizzato nel suo racconto "Che è stato?". Wells, attraverso Griffin, nota che la visibilità di un oggetto è dovuta in gran parte alla sua capacità di riflettere e rifrangere la luce, ma l'ottica ha fatto grandi progressi dai tempi di O'Brien: grazie alle equazioni di Maxwell, è stato dimostrato che c'è sempre *un po'* di luce riflessa, ogni volta che la luce illumina l'interfaccia fra mezzi che hanno indici di rifrazione differenti. Quando, per esempio, la luce passa dall'aria all'acqua, nell'aria viene sempre riflessa un po' di luce, perché l'indice di rifrazione dell'aria è circa 1 e quello dell'acqua è 1,33.

Wells aggira il problema ottenendo l'invisibilità mediante "corrispondenza degli indici". Se due materiali hanno esattamente lo stesso indice di rifrazione, allora non si ha rifrazione e di conseguenza neanche riflessione. Per esempio, il vetro Pyrex (utilizzato per le stoviglie) ha un indice di rifrazione di 1,474, che è pressoché identico a quello dell'olio minerale che si può acquistare in farmacia. Se si immerge un pezzo di vetro Pyrex in un recipiente riempito di olio minerale, il vetro sembrerà scomparire nel liquido.

Anche per un racconto di fantascienza, questa spiegazione va incontro a una difficoltà, perché l'indice di rifrazione dell'aria è quasi esattamente identico a quello del vuoto. Qualsiasi tentativo di rendere un oggetto invisibile nell'aria mediante corrispondenza degli indici dovrebbe rendere l'indice di rifrazione dell'oggetto quasi identico a quello dello spazio vuoto. Qui però Wells ha tratto ispirazione dalla scienza del suo tempo. Nel romanzo, Griffin lo spiega in questo modo: "Ma la fase più importante del procedimento consisteva nel collocare l'oggetto trasparente di cui occorreva abbassare l'indice di rifrazione tra due sorgenti di radiazioni simili alle vibrazioni dell'etere; più tardi le spiegherò tutto il processo con maggior precisione. No, i raggi Röntgen non c'entrano: non mi sembra che si sia mai parlato delle mie radiazioni, per quanto siano di natura piuttosto ovvia"[11]. Il pubblico immaginava che i raggi X in qualche modo rendessero invisibili gli oggetti e le persone; Wells ha sfruttato questa idea errata e ha immaginato un nuovo tipo di raggi che letteralmente rendessero invisibile un oggetto all'occhio nudo. L'idea non era plausibile, nemmeno per il pubblico comune, ma Wells riuscì ad avere un grande successo nella fantascienza costruendo vicende attorno a una singola idea implausibile, ma rendendo realistico tutto il contorno. Lo stesso Wells lo descriveva in questo modo: "Non appena è stato compiuto il trucco magico, il compito dello scrittore di fantasia è mantenere ogni altra cosa umana e reale. Sono imperativi i tocchi di dettaglio prosaico e il rimanere rigorosamente aderenti all'ipotesi. Qualsiasi fantasia aggiuntiva al di là dell'assunto cardinale dà subito all'invenzione un tocco di stupidità sconsiderata"[12].

Chiaramente, la scoperta dei raggi X fu una fonte importante di ispirazione per *L'uomo invisibile*, ma è possibile che ci siano state altre influenze. Nel 1881, Edward Page Mitchell pubblicò sul *New York Sun* un racconto breve, "The Crystal Man", che descriveva i guai di un

assistente di laboratorio, Flack, che si è prestato a fare da cavia per l'invisibilità ma è rimasto bloccato in quella condizione. A differenza del Griffin di Wells, però, Flack è dotato di un insieme di abiti invisibili per mantenere la propria dignità. Mitchell non offre molti particolari sul processo dell'invisibilità, si limita a descriverlo vagamente come un processo chimico di sbiancamento.

> "Ora", continuò Flack, "veniamo alla storia del mio annullamento. Il grande istologo, con cui ho avuto il privilegio di essere associato, rivolse poi la sua attenzione a un altro ramo d'indagine, ancora più interessante. Cercò così semplicemente di aumentare o modificare i pigmenti nei tessuti. A quel punto iniziò una serie di esperimenti per capire se fosse possibile eliminare del tutto dal sistema quei pigmenti mediante assorbimento, essudazione e l'uso di cloruri e altri agenti chimici che agiscono sulla materia organica. Ha avuto fin troppo successo!"[13]

Flack va incontro a una fine tragica per un dolore straziante: quando rivela all'amore della sua vita la propria condizione, lei lo deride e lo rifiuta, spingendolo a togliersi la vita.

Anche se l'idea di sbiancare un essere umano fino a renderlo trasparente può sembrare peregrina, qualcosa del genere è stato effettivamente fatto, in tempi recenti. Nel 2001 dei ricercatori giapponesi hanno presentato un reagente chimico, denominato Scale, che può rendere trasparenti dei campioni biologici[14]. Sono riusciti a prendere sezioni di cervello di topo e anche embrioni non viventi di topo e a renderli trasparenti. In una dichiarazione che avrebbe reso orgogliosi Edward Page Mitchell e H.G. Wells, hanno detto: "Stiamo attualmente studiando un altro potenziale candidato più debole, che ci consenta di studiare nello stesso modo tessuti viventi, a livelli di trasparenza un po' più bassi"[15].

Wells avrebbe continuato a scrivere romanzi e racconti per il resto della vita, ma i suoi maggiori contributi alla fantascienza si sono concentrati in quei primi dieci anni, fra il 1895 e il 1905. In seguito il suo lavoro ha assunto risvolti più sociali e politici, parallelamente ai suoi sforzi per fare del mondo un posto migliore e addirittura

realizzare una società utopica. Il suo influsso sulla fantascienza però è rimasto vivo, e con il passare degli anni altri uomini invisibili avrebbero terrorizzato i lettori.

Un esempio degno di nota arriva da un altro famoso autore di romanzi a sfondo scientifico. Jules Verne, autore dei *Viaggio al centro della Terra* (1867) e di *Ventimila leghe sotto i mari* (1871), ispirandosi a Wells scrisse *Il segreto di Wilhelm Storitz* nel 1897. Nel racconto, Storitz usa il potere dell'invisibilità per cercare di vendicarsi della donna che ha disprezzato le sue *avance* e della sua famiglia. Il segreto dell'invisibilità, ancora una volta, allude ai misteriosi raggi di Röntgen. Verne morì prima che il romanzo (il suo ultimo) fosse pubblicato; fu dato alle stampe, con sostanziali revisioni da parte del figlio, nel 1910[16].

Un uomo invisibile ancora più violento compare in un romanzo di Philip Wylie del 1931, *The Murderer Invisibile*. Wylie è stato un altro autore enormemente influente per la fantascienza: il suo romanzo *Gladiator* (1930), che parla di un uomo dotato di forza straordinaria, ha probabilmente fornito l'ispirazione per Superman, l'eroe dei fumetti, che ha fatto la sua prima comparsa nel 1938. Wylie ha scritto anche il classico *When Worlds Collide* [*Quando i mondi si scontrano*] (1933), racconto apocalittico della lotta dell'umanità per la sopravvivenza, quando si scopre che un pianeta fuori controllo si sta avvicinando alla Terra e presto la distruggerà.

The Murderer Invisible in un certo senso risponde alla domanda: che cosa sarebbe successo se il Griffin de *L'uomo invisibile* fosse stato in grado di realizzare il suo regno del terrore? Nel romanzo di Wylie, uno scienziato pazzo, Carpenter, riesce a rendersi invisibile e crea il panico in tutto il mondo con una serie di omicidi, bombe e incendi dolosi. I piani di Carpenter, però, quasi sfumano prima ancora di iniziare a realizzarsi, quando scopre che le sue ossa non svaniscono con la stessa

rapidità del resto del suo corpo: si ritrova così a essere uno scheletro vivente ben visibile, proprio quando una folla entra in casa sua per fermarlo: “La risposta di Carpenter fu spiritata: ‘Stupidi! Sono un uomo. Un uomo come voi. Ho avuto un incidente che mi ha dato questo aspetto. Non è magia nera. È scienza’. Le mascelle ondeggiavano. Il cranio si girava da una parte all’altra. Qualcuno lo colpì alla testa con una mazza. Finì a terra. Qualcun altro gli diede un calcio. Alcuni si sedettero sopra di lui, lo tenevano a terra con i loro piedi”[17].

Ovviamente, sono stati girati molti film sugli uomini invisibili. *L’uomo invisibile* (1933), con la regia di James Whale, era molto aderente alla trama del romanzo di Wells. *L’uomo senza ombra* (2000), con la regia di Paul Verhoeven, è la storia di un partecipante a un test che è reso invisibile ma impazzisce quando il processo non può essere invertito. Ancora più recentemente, *L’uomo invisibile* (2020), diretto da Leigh Whannell, trae ispirazione dalla stessa fonte, ma racconta una storia di ossessione molto diversa: il suo cattivo indossa un vestito che produce una forma attiva di invisibilità. Il romanzo di Wells fu un punto di svolta nella storia della fisica dell’invisibilità, quando la possibilità (e i pericoli) dell’invisibilità sono entrati nella consapevolezza del pubblico, e vi sono rimasti fino a oggi. Dopo Wells, era inevitabile che gli scienziati si ponessero la domanda: l’invisibilità è *realmente* possibile?

---

1 Röntgen, “New Kind of Rays”.

2 Frankel, “Centennial of Rontgen’s Discovery”.

3 Il comune nastro Scotch è adesivo perché ha regioni locali di carica positiva e negativa che si attraggono con forza. Nel 2008, alcuni ricercatori hanno dimostrato che, svolgendo nastro adesivo in un vuoto, si possono produrre raggi X, perché le cariche saltano dalla sezione staccata del nastro a quella liscia a cui aderiva. In assenza di aria che li rallenti, gli elettroni producono raggi X quando si ricombinano con il nastro.

4 Bostwick, “‘Seeing’ with X-Rays”.

5 Wells, *Experiment in Autobiography*, p. 53.

6 Ivi, p. 62.

7 Ivi, p. 172.

8 Ivi, p. 254.

9 Broglie, “Wave Nature of the Electron”.

10 Il mio referente di dottorato, Emil Wolf, una volta scherzando disse di uno dei suoi studenti che “causa più problemi di quelli che risolve”. Non voleva essere offensivo, però: quello studente era così brillante che mentre risolveva un singolo problema scopriva regolarmente molte altre domande su cui indagare. È l’ideale per la scienza: rispondere a domande e intanto scoprire nuove domande a cui dare una risposta.

11 Agli studenti che iniziano a studiare la fisica quantistica spesso viene insegnato il mantra: “State zitti e calcolate”. In altre parole si dice loro di non preoccuparsi del perché la fisica funziona, ma di usarla semplicemente senza fare domande. È passato oltre un secolo da quando è iniziata l’epoca della fisica quantistica, ma ancora non sappiamo esattamente che cosa ci dica sulla natura dell’universo. Per prendere a prestito una frase da *L’ultima occasione*, di Douglas Adams e Mark Carwardine, “Era difficile non pensare che da qualche parte a qualcuno era sfuggito qualcosa. Ma non potevo nemmeno giurare che non fossi io a non aver capito bene” (p. 158).

12 Schott, “V. Reflection and Refraction of Light”.

13 Schott, “LIX. Radiation from Moving Systems of Electrons”, p. 667.

14 Schott, “XXII. Bohr’s Hypothesis of Stationary States of Motion”, pp. 258, 243.

15 Schott, “LIX. Electromagnetic Field of a Moving Uniformly and Rigidly Electrified Sphere”.

16 Ivi, pp. 752-53.

17 Schott, “Electromagnetic Field due to a Uniformly and Rigidly Electrified Sphere in Spinless Accelerated Motion and Its Mechanical Reaction on the Sphere”, I, II, III, IV.

Capitolo 9

Che cosa c’è in un atomo?

> Ad ogni passo mi trovavo bloccato a causa dell’imperfezione della mia strumentazione. Come tutti i microscopisti ricercatori, davo libero sfogo alla mia immaginazione. In realtà ci si lamenta spesso verso coloro che agiscono in tali termini, dicendo che suppliscono all’inefficacia degli strumenti di studio con creazioni delle loro menti. Immaginavo abissi dopo abissi nella natura, che il limitato potere delle mie lenti mi proibiva di esplorare. Giacevo sveglio di notte, immaginando fantastici microscopi dai poteri illimitati, con i quali avrei potuto indagare tutti i risvolti della materia fino all’atomo primordiale.
> – Fitz-James O’Brien, *The Diamond Lens* (1881) [trad. it. p. 16]

Gli scrittori di fantascienza hanno iniziato a considerare la possibilità dell’invisibilità già negli anni Cinquanta dell’Ottocento, ma la scienza ha cominciato a prenderla in considerazione solo una sessantina di anni dopo. I primi passi verso l’invisibilità scientifica hanno avuto origine da una fonte improbabile: i tentativi di rispondere alla domanda fondamentale, “Che cosa c’è in un atomo?”.

L’idea di atomo è precedente alla nascita della scienza formale. Il nome stesso deriva dal greco antico: nel quinto secolo a.C., il filosofo Democrito e il suo maestro Leucippo introdussero il termine, insieme con l’idea che tutta la materia sia fatta di tali componenti fondamentali indivisibili, circondati dal “vuoto”. Idee simili in realtà erano comparse già molto prima, nell’ottavo secolo a.C. in India, a partire dal saggio bramino indù Aruni. Quest’idea degli atomi si basava completamente su argomentazioni filosofiche, senza alcuna prova sperimentale a sostegno. Nell’antica Grecia, i filosofi successivi in generale respinsero la filosofia atomistica.

L'idea degli atomi iniziò finalmente a entrare nell'ambito scientifico nel XVII secolo. Isaac Newton iniziò a riflettere su una versione della teoria atomica, senza darle questo nome, nelle edizioni successive della sua *Opticks*.

> Ora le più piccole particelle di materia possono essere coese a causa delle attrazioni più forti e comporre particelle più grandi di più debole forza; e molte di queste possono unirsi e comporre particelle più grandi la cui forza è ancora più debole, e così via per varie successioni, finché la progressione termina con le particelle più grandi da cui dipendono le operazioni della chimica e i colori dei corpi naturali, e che unendosi fra loro compongono corpi di grandezza percepibile ai sensi.[1]

Gli atomi sono entrati nel mainstream scientifico, però, solo circa un centinaio d'anni dopo. Ironicamente, nella stessa epoca in cui Thomas Young e altri si rendevano conto che la luce si comporta più come un'onda continua che come una particella, altri ricercatori ottenevano indicazioni per le quali la materia consiste di particelle discrete anziché di una sostanza continua, divisibile all'infinito.

Il protagonista principale di questo cambiamento di prospettiva fu il chimico inglese John Dalton, che presentò formalmente una teoria atomica nei volumi del suo *A New System of Chemical Philosophy*, la cui pubblicazione iniziò nel 1807. Dalton ipotizzava che gli elementi chimici fossero costituiti da particelle estremamente piccole e indistruttibili, che chiamava "atomi"; sosteneva inoltre che gli atomi di uno stesso elemento, come l'ossigeno, fossero tutti identici fra loro. L'origine della teoria atomica di Dalton è curiosamente poco chiara, perfino allo stesso Dalton, che ne diede versioni diverse nel corso della sua vita[2]. Introdusse però nella discussione un elemento sperimentale importante, che oggi va sotto il nome di legge delle proporzioni multiple. Secondo questa legge, se due elementi si possono combinare, formando più di un composto, il rapporto fra le masse del secondo elemento che entrano nei diversi composti è sempre un numero intero.

La legge si capisce meglio con un esempio. Il carbonio si può combinare con l'ossigeno e formare due diversi composti, uno dei quali richiede più ossigeno dell'altro. Con 100 grammi di carbonio, il primo composto si può formare con 133 grammi di ossigeno, mentre il secondo si può formare con 266 grammi di ossigeno. Dalton notò che la quantità di ossigeno nel secondo composto era esattamente il doppio di quella del primo, il che suggeriva che il primo composto avesse un atomo di ossigeno per ogni atomo di carbonio, mentre il secondo avesse due atomi di ossigeno per ogni atomo di carbonio. Oggi chiamiamo i due composti rispettivamente monossido di carbonio e biossido di carbonio (o anidride carbonica).

La legge delle proporzioni multiple era una prova indiretta dell'esistenza degli atomi e le regole della combinazione chimica indicavano che la materia deve presentarsi in quantità discrete. La legge però non mostrava direttamente l'effetto di singoli atomi e lasciava aperta la possibilità di spiegazioni differenti. Il lavoro di Dalton spinse molti ricercatori a credere nell'esistenza degli atomi, ma l'idea rimase controversa e dibattuta per tutto il XIX secolo.

Un'altra osservazione sperimentale all'inizio del secolo si sarebbe dimostrata centrale per la verifica della teoria atomica. Nel 1827, il botanico scozzese Robert Brown stava studiando piccoli grani di polline in acqua quando notò che particelle molto piccole emesse dai granelli nell'acqua presentavano un moto irregolare, a zig-zag, quasi come se avessero vita propria. Brown ripeté l'esperimento con particelle molto piccole di materia organica e confermò che il moto non era dovuto a organismi viventi; non fu in grado però di darne una spiegazione e il "moto browniano" rimase un rompicapo per quasi un secolo.

Gli scienziati stavano lentamente convincendosi dell'esistenza degli atomi, ma avevano difficoltà a spiegarne la natura in ogni dettaglio.

Con il passare degli anni l'idea che si consolidò era che gli atomi fossero sfere rigide, impenetrabili, circondate da un "campo di forza" a causa del quale erano attratte da certi elementi e respinte da altri, il che dava luogo a tutta la complessità della chimica. Anche questa immagine vaga, però, era in conflitto con i risultati sperimentali. Nel 1844, niente meno che Michael Faraday pubblicò "A Speculation Touching Electric Conduction and the Nature of Matter", in cui esponeva alcune delle sconcertanti osservazioni che erano state fatte in merito agli atomi[3].

In base all'idea convenzionale degli atomi, un materiale solido doveva essere costituito da un insieme di queste sfere rigide, molto vicine fra loro, ma senza toccarsi, tenute separate da forze particolari. A quel punto, però, si chiedeva Faraday, perché certi materiali erano buoni conduttori di elettricità e altri invece erano buoni isolanti? Un conduttore, come l'oro o l'argento, deve condurre l'elettricità attraverso i suoi interstizi vuoti, era il suo ragionamento, e quindi lo spazio deve essere un conduttore. Se però si prende in considerazione un isolante come la gommalacca, si arriverebbe alla conclusione opposta: lo spazio deve essere un isolante.

Il modello delle sfere rigide, come l'abbiamo descritto, fa pensare che siano disposte in modo molto compatto le une accanto alle altre, ma Faraday notò che nelle reazioni chimiche alcuni materiali *diminuiscono* di volume, quando si aggiungono ulteriori atomi all'insieme. Se si aggiungono ossigeno e idrogeno al potassio puro, per esempio, si ottiene idrato di potassio, che ha un volume minore. Se gli atomi fossero sfere strettamente impaccate, l'aggiunta di ulteriori atomi farebbe sempre aumentare il volume. Faraday ne concluse, con una buona intuizione, che le sfere rigide degli atomi devono essere *molto* più piccole del campo di forza che le circonda. Arrivò al punto da condividere le idee dell'atomista ragusano Ruggero Giuseppe

Boscovich (1711-1787), che aveva ipotizzato che un atomo fosse un puro campo di forza senza alcuna sfera rigida o, al massimo, una sfera puntiforme al centro[4].

Faraday fu attento a definire “speculazioni” le sue idee sulla struttura atomica, perché a quel tempo non esisteva alcun metodo per osservare direttamente la struttura di un atomo e vedere di che cosa fosse fatto. Autori di fantascienza come Fitz-James O’Brien nel suo racconto “La lente di diamante” (1858) aveva immaginato di creare un microscopio tanto potente da poter osservare gli interstizi fra gli atomi e vedere un universo nascosto di creature viventi subatomiche. Una conseguenza della teoria ondulatoria della luce di Thomas Young, però, era che un microscopio non può risolvere oggetti più piccoli della lunghezza d’onda della luce stessa. La luce visibile, con una lunghezza d’onda di circa metà di un milionesimo di metro, è sufficiente per osservare cellule viventi e alcune delle loro strutture interne, ma è del tutto inadeguata per cogliere i dettagli degli atomi (che, come si sarebbe scoperto in seguito, sono dell’ordine di un decimo di un *miliardesimo* di metro).

Con il passare degli anni del XIX secolo, iniziarono a essere svelati indizi molto curiosi sulla struttura dell’atomo. Il primo indizio venne dalla tavola periodica degli elementi, presentata nel 1869 da un professore di chimica russo, Dmitrij Mendeleev. La tavola, di cui probabilmente si può trovare una versione moderna sulle pareti delle aule di scienze di qualsiasi scuola del mondo, venne costruita da Mendeleev mentre attendeva alla preparazione di un manuale di chimica. Mentre cercava di classificare i vari elementi noti in base alle loro proprietà chimiche, si rese conto che, disponendoli per peso atomico crescente, quelle loro proprietà formavano una struttura periodica. Lasciando nella tabella una casella vuota quando a certe proprietà non corrispondeva un elemento noto, fu in grado di

prevedere l'esistenza di elementi ancora da scoprire e le loro proprietà. Molti di quegli elementi furono scoperti nel giro di poco tempo dopo la pubblicazione del lavoro di Mendeleev e fornirono un forte sostegno al suo lavoro. La tavola periodica indicava l'esistenza di qualche tipo di struttura di fondo che metteva in relazione fra loro tutti gli elementi, anche se nessuno era ancora in grado di dire che cosa fosse quella struttura.

Il successivo indizio importante fu la scoperta dell'elettrone come vettore fondamentale della carica elettrica. I raggi X erano stati scoperti nel 1895 da Wilhelm Röntgen in esperimenti con i raggi catodici che trasportavano elettricità; nel 1897, il fisico inglese J.J. Thomson dimostrò sperimentalmente che quei raggi in effetti erano un flusso di particelle a carica negativa, ciascuna con una massa mille volte più piccola del più piccolo fra gli atomi. Thomson lì chiamò "corpuscoli", ma poi fu adottato universalmente il nome di "elettrone". Fu immediatamente chiaro che quegli elettroni erano uno dei componenti fondamentali degli atomi ma nessuno ancora riusciva a stabilire quale ruolo avessero nella struttura atomica.

Un terzo indizio cruciale venne dalla scoperta della radioattività. Nel 1896, il fisico francese Henri Becquerel stava studiando il fenomeno della fosforescenza, in cui un materiale assorbe luce ed emette una radiazione diversa per un lungo periodo di tempo. Avendo saputo della scoperta dei raggi X, Becquerel si chiese se nella fosforescenza venissero emessi proprio quei raggi, e progettò degli esperimenti per mettere alla prova quella possibilità. Avvolse delle lastre fotografiche in carta nera pesante, in modo che non potessero essere raggiunte dalla luce visibile, e collocò sopra le lastre un materiale fosforescente. Lasciando quella struttura al sole, ipotizzò che la luce solare avrebbe generato raggi X fosforescenti, che sarebbero

passati attraverso la carta e avrebbero lasciato una traccia sulle lastre fotografiche.

La sua ipotesi sembrò confermata quando utilizzò sali di uranio fosforescenti, e riferì i suoi risultati all'Accademia francese delle scienze verso la fine di febbraio del 1896. Poi, però, ebbe un momento di pura fortuna: preparò altre lastre per gli esperimenti, ma la giornata era nuvolosa, così mise le lastre fotografiche, con i sali di uranio al di sopra, in un cassetto, in attesa di tempi migliori. Vari giorni dopo decise di sviluppare comunque una delle lastre e, con sorpresa, scoprì un'immagine ancora più vivida di quelle che erano state generate negli esperimenti con la luce solare. Ulteriori test con sali di uranio non fosforescenti lo portarono a una conclusione sorprendente: l'uranio emetteva autonomamente raggi misteriosi, fenomeno che oggi chiamiamo radioattività. In poco tempo furono scoperti altri elementi radioattivi e si stabilì che potevano essere emessi tre tipi di radiazione, con caratteristiche molto diverse, che furono denominati radiazione "alfa" (α), "beta" (β) e "gamma" (γ), dalle prime tre lettere dell'alfabeto greco.

Ci sarebbero voluti diversi anni per capire a fondo il senso della radioattività, ma si trattava di una prova ulteriore che all'interno degli atomi succedono cose molto complicate e che un atomo deve a sua volta essere costituito da più componenti.

Un ultimo indizio sulla struttura degli atomi venne dall'emissione e dall'assorbimento della luce. Nel 1814, il fisico ottico tedesco Joseph von Fraunhofer collegò un prisma a un telescopio per separare i colori della luce solare, come aveva fatto oltre un secolo prima Newton. Osservando lo spettro della luce solare, Fraunhofer notò che conteneva alcune linee scure, dove a quanto pareva il Sole non emetteva alcuna luce (Figura 9.1).
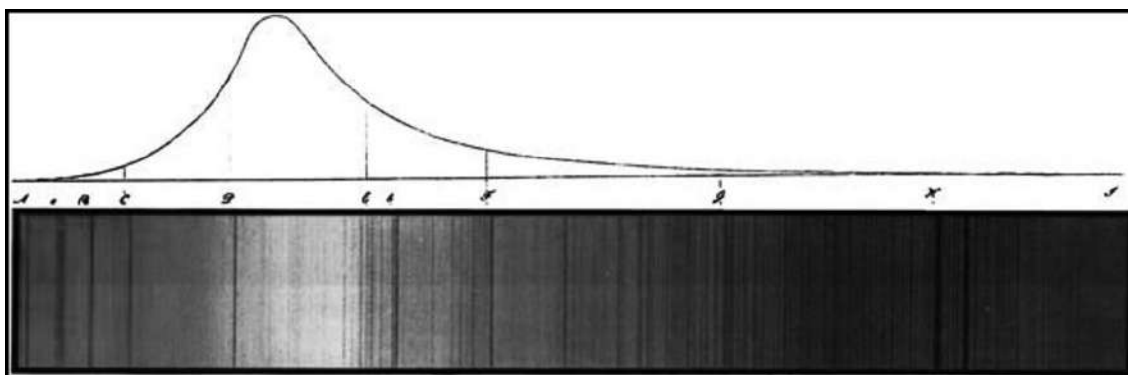
Figura 9.1 Il disegno originale di Fraunhofer dello spettro solare, con le linee scure nello spettro altrimenti continuo (qui è riprodotto in scala di grigi: andate a vederne la versione originale, a colori, online).

Quelle linee in seguito sono state fatte risalire a singoli elementi atomici, e si è scoperto che i singoli elementi hanno determinate lunghezze d’onda speciali alle quali assorbono ed emettono luce. Per esempio, se si brucia o si eccita elettricamente un particolare elemento e si usa un prisma per separare i colori, il risultato è uno spettro di linee luminose fra loro separate. Viceversa, la luce solare che passa attraverso un campione trasparente di quell’elemento (in forma gassosa, per esempio) mostra che l’elemento assorbe luce in corrispondenza delle medesime linee spettrali. Le 574 linee scure che Fraunhofer vide nello spettro della luce solare rappresentavano l’assorbimento dei raggi solari da parte di diversi elementi all’interno del Sole stesso. L’osservazione di Fraunhofer diede origine al campo della spettroscopia (la determinazione del contenuto chimico di un materiale in base alla luce che emette), che è ancora una tecnica standard nella scienza e nell’ingegneria.

Queste linee spettrali di elementi diversi chiaramente avevano qualcosa a che fare con la struttura degli atomi, ma per gran parte del XIX secolo nessuno ebbe idea di come interpretarle. Nel 1885, però, il matematico svizzero Johann Jakob Balmer, allora sessantenne, esaminò specificamente la posizione delle linee spettrali per il più

leggero fra gli atomi, quello di idrogeno, e scoprì una formula matematica molto semplice che gli permetteva di prevedere la posizione di tutte le linee spettrali dell'idrogeno per la luce visibile. Nel 1888, il fisico svedese Johannes Rydberg mostrò che la formula di Balmer poteva essere estesa in modo da prevedere le linee spettrali dell'idrogeno anche nell'ultravioletto e nell'infrarosso e stimare le lunghezze d'onda delle linee spettrali anche di altri atomi. Quella formula era il primo indizio quantitativo sulla struttura dell'atomo.

Agli inizi del XX secolo, la comunità scientifica era ampiamente convinta ormai dell'esistenza degli atomi e aveva una serie di indizi interessanti, ma sconcertanti, sulla loro struttura. Non esisteva però alcun modo per studiarla direttamente. Così gli scienziati facevano quello che si fa naturalmente in una situazione simile: avanzavano ipotesi di ogni genere. Alcuni fra i fisici più importanti dell'epoca, fra cui vari futuri premi Nobel, parteciparono a quella gara di speculazioni, che sarebbe durata all'incirca un decennio (Figura 9.2).
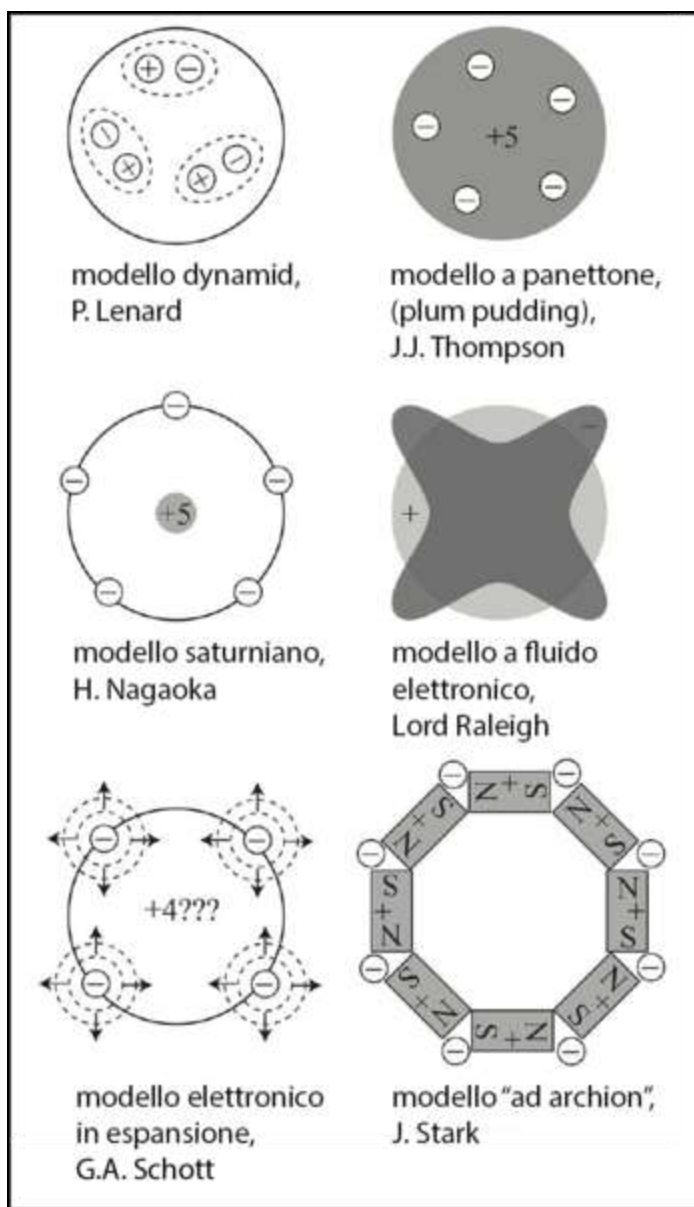
Figura 9.2 Vari modelli dell'atomo proposti agli inizi del XX secolo.

La prima ipotesi fu avanzata dal fisico francese Jean Baptiste Perrin, uno dei più accaniti sostenitori della teoria atomica. In una conferenza del 1901 sulla "ipotesi molecolare" ipotizzò che gli atomi fossero strutturati come il sistema solare, con un "sole" a carica positiva circondato da elettroni come pianeti: "Ogni atomo consisterebbe, innanzitutto, di una o più masse fortemente cariche di elettricità

positiva, una sorta di sole la cui carica positiva è molto superiore a quella di un corpuscolo e, in secondo luogo, da una moltitudine di corpuscoli, una sorta di piccoli pianeti negativi, e tutte le masse gravitano sotto l'azione di forze elettriche e la carica negativa totale è esattamente uguale alla carica positiva totale, cosicché l'atomo è elettricamente neutro"[5]. L'ipotesi aveva un grave punto debole: le orbite degli elettroni attorno a un sole positivo sarebbero instabili e tenderebbero a collassare per qualsiasi perturbazione significativa. Il sistema solare appare stabile perché (per fortuna) non abbiamo collisioni con altri sistemi solari; gli atomi planetari, collidendo fra loro regolarmente, finirebbero in pezzi in breve tempo.

J.J. Thomson, lo scopritore dell'elettrone, affrontò con un suo modello questo limite[6]. Immaginò che la carica positiva dell'atomo fosse dispersa come un fluido a carica positiva entro cui orbitano gli elettroni. Preparò una trentina di pagine di calcoli da cui risultava che il suo sistema, nelle circostanze giuste, poteva dare stabilità agli elettroni orbitanti. Il suo modello è noto come modello "a panettone" (*plum-pudding*, in inglese), perché spiegava la circolazione degli elettroni come "uvette" in un "panettone" positivo. Thomson dimostrò poi che gli elettroni potevano essere espulsi dal panettone se la loro velocità scendeva sotto una soglia critica, generando un fenomeno che poteva essere interpretato come radioattività.

Un diverso approccio al problema della stabilità fu suggerito nel 1904 dal fisico giapponese Hantaro Nagaoka[7]. Il suo modello manteneva il sole a carica positiva di Perrin, ma ipotizzava che gli elettroni fossero disposti in anelli, come quelli che circondano il pianeta Saturno. Nel 1859, James Clerk Maxwell aveva dimostrato sul piano teorico che gli anelli di Saturno rimanevano stabili se soggetti a deboli perturbazioni, oscillando invece di rompersi. Nagaoka mostrò che le analoghe oscillazioni di un atomo saturniano potevano produrre

qualcosa di approssimativamente simile alle linee spettrali osservate da Fraunhofer e altri.

Nel 1906 entrò in campo un altro famoso fisico. Lord Rayleigh diede un'infinità di contributi alla fisica teorica e sperimentale, in particolare nei campi della meccanica dei fluidi e dell'ottica, fra cui la spiegazione corretta del perché il cielo sia azzurro. Sfruttando le sue competenze principali, propose una modifica del modello a panettone di Thomson.[8] Il modello di Thomson ipotizzava l'esistenza nell'atomo di un numero molto piccolo di elettroni; Rayleigh si chiese che cosa sarebbe successo se fosse stato vero il contrario: e se l'atomo contenesse così tanti elettroni da poter considerare il loro insieme come un fluido? Nei suoi calcoli, Rayleigh scoprì che quel mare di elettroni poteva entrare in vibrazione, come una scodella di gelatina, e che quelle vibrazioni potevano avere come risultato linee spettrali discrete. Le linee calcolate da Rayleigh però non corrispondevano affatto a quelle calcolate con la formula di Rydberg.

Sempre nel 1906 James Jeans, fisico e cosmologo inglese, autore di vari libri scientifici e di divulgazione, offrì un'altra variante del modello di Thomson. Notò che, in base alle grandezze fisiche coinvolte nel modello di Thomson, era matematicamente impossibile derivare una grandezza che dipendesse dalla lunghezza d'onda o, equivalentemente, dalla frequenza[9]. Perciò il modello non poteva da solo spiegare le linee spettrali discrete degli elementi. Jeans suggerì invece che gli elettroni potevano essere non particelle puntiformi, come si dava in precedenza per scontato, ma sfere elastiche di dimensioni finite, in grado di entrare in vibrazione e di produrre le linee nello spettro.

Un altro scienziato si lasciò andare a speculazioni sulla struttura degli atomi nel 1906: il matematico inglese George Adolphus Schott concordava con Jeans che mancasse qualcosa nel modello di Thomson

e che la risposta potesse stare in un elettrone di dimensioni finite. Secondo Schott però le frequenze vibrazionali dell'elettrone derivavano dal fatto che l'elettrone cercasse costantemente di crescere in dimensioni e che alla sua crescita si opponesse l'ipotetico etere, attraverso il quale viaggiano le onde elettromagnetiche[10]. Nei suoi calcoli, notava inoltre che il suo modello prevedeva una attrazione fra gli elettroni, e ipotizzava che potesse trattarsi della forza di gravità. La teoria di Schott non fu presa in seria considerazione da altri scienziati, ma non sarebbe stata l'unica occasione in cui Schott avrebbe proposto una soluzione particolarmente originale a un problema, come vedremo più avanti.

L'interesse esplosivo per i modelli atomici nel 1906 non era un caso. Nel 1905, un fisico allora relativamente poco noto, Albert Einstein aveva pubblicato un articolo il cui titolo (tradotto in italiano) era "Sulla teoria cinetico-molecolare del movimento dovuto al calore di particelle sospese in liquidi a riposo".11 Einstein vi sosteneva che il moto browniano irregolare di piccole particelle in un liquido poteva essere spiegato dalle collisioni intermittenti delle particelle visibili con gli atomi invisibili del liquido. L'idea era stata avanzata già in precedenza, ma Einstein ne presentò un'analisi matematica dettagliata, formulando previsioni che potevano essere controllate sperimentalmente, e il suo lavoro rinnovò l'interesse per la struttura atomica. Nel 1910 Jean Perrin verificò le previsioni di Einstein relative al moto browniano e anche l'ultimo degli scettici sull'esistenza degli atomi dovette arrendersi, di fronte alle prove ormai schiaccianti.

Nessuno degli scienziati che aveva avanzato ipotesi sapeva quali osservazioni sarebbero state più importanti per svelare i segreti degli atomi. Quelli che abbiamo citato avevano concentrato la propria attenzione sulla spiegazione delle formule di Balmer e Rydberg, ma altri si concentrarono sulla struttura della tavola periodica.

Il fisico ungherese-tedesco Philipp Lenard verso la fine del XIX secolo condusse ampi studi sui raggi catodici, per i quali poi fu insignito del premio Nobel per la fisica, e aveva notato che la capacità di un materiale di assorbire elettroni dipende dalla sua massa, mentre le sue specifiche proprietà chimiche da quel punto di vista contavano poco. Questo gli fece pensare che gli atomi fossero costituiti tutti dagli stessi componenti fondamentali e che l'unica differenza fra i vari elementi fosse la presenza di un numero maggiore o minore di quei componenti. Nel 1903 ipotizzò che il "mattone" fondamentale con cui sono costruiti tutti gli elementi fosse quello che chiamava *dynamid*: una carica positiva e una negativa legate fra loro[12]. Nel suo modello, la massa atomica di un atomo è semplicemente proporzionale al numero dei dynamid presenti: un atomo di idrogeno sarebbe formato da un singolo dynamid, l'elio da quattro dynamid e così via. Non spiegava la forza che avrebbe dovuto tenere insieme i dynamid. Il suo modello poteva spiegare approssimativamente la struttura della tavola periodica, ma non le linee negli spettri.

Il modello più fantasioso fu presentato nel 1910 dal fisico tedesco Johannes Stark, futuro premio Nobel[13]. Anche Stark cercava di spiegare la struttura della tavola periodica e ipotizzò un'unità fondamentale di carica positiva chiamata *archion*, che immaginava sostanzialmente come un minuscolo magnete a barra dotato di carica elettrica positiva. Quelle cariche positive, che normalmente si sarebbero allontanate l'una dall'altra per repulsione, sarebbero state tenute legate dalla forza magnetica e dagli elettroni a carica negativa. Stark immaginava che quegli archion formassero anelli chiusi di magneti a barra, con i poli nord e sud adiacenti allineati. Gli atomi di elementi diversi avrebbero avuto anelli di dimensioni diverse. Il modello di Stark cercava di cogliere il significato della tavola

periodica, ma aveva a sua volta il limite di non poter spiegare la formula di Rydberg.

È importante notare che questi tentativi di descrivere la struttura atomica non erano speculazioni a ruota libera, ma una sorta di sessione di brainstorming scientifico a livello internazionale, condotto per iscritto attraverso varie riviste scientifiche in tanti paesi diversi. Ogni scienziato condivideva la propria idea incompleta, con la speranza che altri potessero svilupparla e arrivare più vicino alla verità.

Tutti i modelli proposti in quel periodo, però, avevano un difetto fondamentale. Le equazioni di Maxwell prevedono che una carica elettrica sottoposta ad accelerazione (per esempio, in moto lungo un percorso circolare) emetta radiazione. Oggi, questo ha applicazioni pratiche: ogni torre radio e ogni telefono cellulare usano correnti elettriche oscillanti per generare onde radio. Allo Argonne National Laboratory in Illinois, l'Advanced Photon Source invia elettroni lungo un anello di accumulazione circolare con una circonferenza di 1.100 metri a velocità vicina a quella della luce, e gli elettroni in accelerazione producono raggi X utilizzabili per vari progetti di ricerca.

Ognuno dei modelli atomici citati richiedeva, esplicitamente o implicitamente, che gli elettroni si muovessero in orbite circolari attorno al centro dell'atomo. Gli scienziati potevano calcolare facilmente quanta radiazione dovessero emettere quegli elettroni e scoprirono che avrebbero dovuto consumare tutta la loro energia e collassare sul nucleo in una frazione di secondo. Perché un modello atomico potesse sopravvivere, doveva spiegare perché esistano atomi stabili.

Per il primo decennio del XX secolo, non ci furono tentativi significativi di risolvere questo enigma. Nel 1910, però, il fisico teorico austriaco-olandese Paul Ehrenfest pubblicò un breve articolo

sui “Movimenti elettrici irregolari senza campi magnetici e di radiazione”[14]. Vi sosteneva che, nelle circostanze giuste, è possibile che una distribuzione *estesa* di carica elettrica, come la sfera elettronica vibrante di James Jeans, acceleri senza produrre radiazione. Questa idea sarebbe stata riconosciuta poi come una delle prime idee scientifiche importanti per la fisica dell’invisibilità.

Ai tempi di quell’articolo, Ehrenfest era solo da poco attivo in campo scientifico. Aveva sviluppato un interesse per la meccanica statistica, che applica la matematica alla descrizione del comportamento di grandi insiemi di particelle, come le molecole di liquidi e gas. C’era stato un rinnovamento dell’interesse per la meccanica statistica, dovuto in parte alla spiegazione del moto browniano da parte di Einstein, che aveva dimostrato quanto fosse potente l’applicazione della statistica per la quantificazione di problemi fisici. Ehrenfest ottenne il dottorato nel 1904 e nel 1906 lavorava a un articolo di rassegna sulla meccanica statistica con la moglie Tatyana, a sua volta matematica di talento. Ehrenfest sarebbe poi stato considerato uno dei ricercatori fondamentali di quel campo. Con quel lavoro, avrebbe sempre avuto ben presenti gli atomi e il loro comportamento, ed era chiaramente consapevole dei problemi dei modelli atomici esistenti.

Ehrenfest iniziò il suo articolo con un paio di esempi che utilizzavano uno degli strumenti più potenti nella “cassetta degli attrezzi” di un fisico teorico: la simmetria. In primo luogo, immaginò un foglio di materiale di grandezza infinita, con la carica elettrica distribuita uniformemente sulla sua superficie. Quando il foglio non è in moto, il suo campo elettrico deve essere perpendicolare al foglio stesso, perché il foglio appare identico in ogni punto sulla sua superficie: è simmetrico sulla superficie. Poi immaginava che il foglio oscillasse su e giù (Figura 9.3). Il foglio di cariche elettriche subisce

un’accelerazione, e ci si aspetterebbe quindi che produca radiazione. Ogni radiazione prodotta, però, deve propagarsi perpendicolarmente al foglio, e ogni campo magnetico creato deve propagarsi perpendicolarmente al foglio. Questo significa che l’unico modo in cui questo sistema potrebbe generare un’onda elettromagnetica sarebbe se il campo elettrico e quello magnetico puntassero entrambi nella direzione in cui si propaga l’onda. Come aveva mostrato Maxwell, però, le onde elettromagnetiche sono onde trasversali e sono sempre perpendicolari alla direzione di propagazione dell’onda. Perciò, sosteneva Ehrenfest, in questo sistema non si genera radiazione. I campi elettrici e magnetici prodotti dal foglio oscillante sono localizzati nell’area immediatamente circostante il foglio.
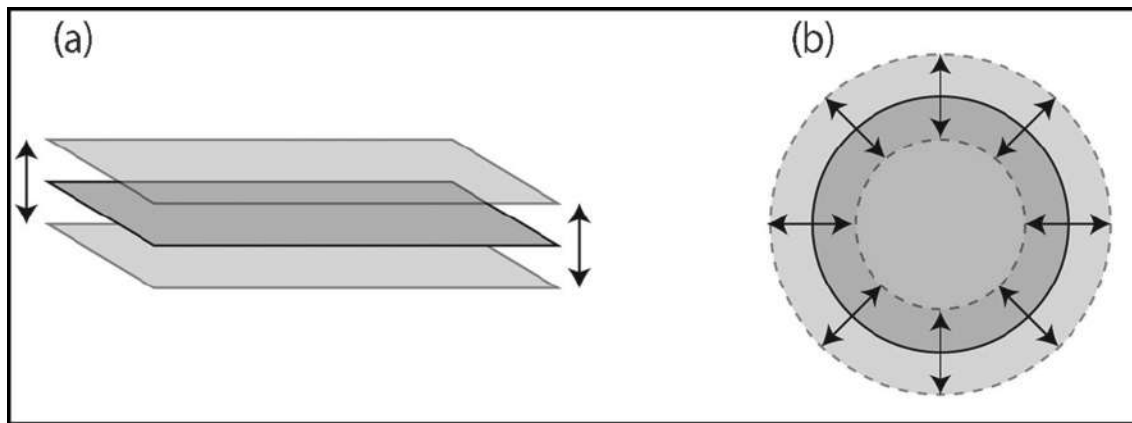
Figura 9.3 I semplici modelli di Paul Ehrenfest: (a) un piano infinito che vibra su e giù e (b) una sfera che pulsa.

Ehrenfest stesso ammetteva che l’esempio è un po’ artificiale, poiché richiede un foglio di carica elettrica di lunghezza e larghezza infinita, una cosa che in natura non esiste. Perciò presentò un secondo esempio: un guscio sferico rivestito uniformemente di carica elettrica, il cui raggio alternativamente aumenta e diminuisce. Si può pensare a un pallone sferico, rivestito di carica elettrica, che viene rapidamente gonfiato e sgonfiato. Tutto il moto delle cariche è in direzione radiale, verso il centro della sfera o in direzione opposta; sempre per

simmetria, l'unica direzione in cui possono puntare i campi elettrici e magnetici è quella radiale. Inoltre, l'unica direzione in cui può propagarsi l'onda è quella radiale. Di nuovo, sosteneva Ehrenfest, abbiamo una situazione in cui l'unica direzione possibile per il campo elettrico, il campo magnetico e la propagazione dell'onda è quella radiale; dato però che un'onda può propagarsi solo se tutte e tre queste grandezze sono fra loro perpendicolari, non ci può essere alcuna onda che si propaga. La sfera pulsante è anche priva di radiazione.

Le argomentazioni basate sulla simmetria in fisica sono di difficile comprensione, perciò ne presenterò una analoga tratta dalla filosofia, quella nota come "asino di Buridano", dal nome del filosofo francese del quattordicesimo secolo Giovanni Buridano. Immaginate un asino affamato che si trova alla stessa distanza da due mucchi identici di fieno. Buridano e altri hanno sostenuto che l'asino sarebbe andato verso il mucchio più vicino; poiché però i due mucchi sono parimenti vicini, l'asino non riesce a decidersi, rimarrà fermo e morirà d'inedia. Il paradosso è utilizzato nelle discussioni filosofiche sul concetto di libero arbitrio.

Possiamo utilizzare un ragionamento simile a quello dell'asino di Buridano per spiegare quello di Ehrenfest basato sulla simmetria. Perché un'onda elettromagnetica si propaghi da un piano che vibra deve avere un campo elettrico e magnetico trasversali; in altre parole, quei campi devono puntare da qualche parte sulla superficie del piano. Nell'impostazione del sistema però non c'è nulla che "scelga" una direzione per questi campi elettrici e magnetici: ogni moto è perpendicolare al piano. Se non c'è alcuna parte del sistema che scelga una direzione, non si può generare alcuna onda elettromagnetica.

Ehrenfest non si basò solamente su questi due esempi semplici. Mostrò anche come utilizzare le equazioni di Maxwell per costruire (almeno sul piano teorico) un'ampia varietà di distribuzioni estese di

cariche elettriche in accelerazione che non producessero radiazione. Ben lontana dall’essere una stravaganza isolata, la fisica delle oscillazioni senza radiazione poteva essere considerata una parte fondamentale della teoria delle onde elettromagnetiche. Anche se cariche elettriche puntiformi produrranno sempre radiazione se sottoposte ad accelerazione, volumi estesi di carica hanno la possibilità di accelerare senza produrre radiazione.

La teoria di Ehrenfest non suscitò molta attenzione, ed è ancora ampiamente ignota alla più ampia comunità dei fisici, probabilmente perché fu formulata in un momento poco favorevole: mentre Ehrenfest elaborava i suoi risultati, nuovi dati sperimentali sulla struttura dell’atomo avrebbero modificato la conversazione e aperto un’epoca del tutto nuova per la fisica.

Ancora nel 1895, Philip Lenard aveva dimostrato che gli elettroni potevano essere trasmessi attraverso una sottile finestra di quarzo. Ne concludeva che fra gli atomi della finestra deve esistere uno spazio significativo, perché gli elettroni possano passarvi attraverso. Questa conclusione aveva un ulteriore aspetto importante: mostrava che gli elettroni, e altre particelle, avevano il potenziale per sondare la struttura della materia, cosa impossibile con la luce.

Un fisico neozelandese, Ernest Rutherford, decise di esplorare questa possibilità. Nel 1895 aveva vinto una borsa di studio che gli aveva consentito di recarsi a svolgere ricerche post-dottorato al Cavendish Laboratory dell’Università di Cambridge, proprio nel periodo in cui vennero scoperti i raggi X, gli elettroni e la radioattività. Lavorava sotto la direzione di J.J. Thomson e, perciò, fu presente alla scoperta dell’elettrone. Nel 1898 accettò una cattedra alla McGill University in Canada, e lì inizio a svolgere ampie ricerche sulla radioattività e i raggi X. Una delle sue scoperte degne di nota fu l’osservazione dell’esistenza di forme diverse di radiazione, e fu

proprio Rutherford a coniare i termini di radiazione alfa e beta. Compì altre scoperte significative legate alla radioattività e nel 1907 tornò in Inghilterra, alla Victoria University di Manchester. Un anno dopo, fu insignito del premio Nobel per la chimica “per le sue ricerche sulla disintegrazione degli elementi e la chimica delle sostanze radioattive”[15].

A Manchester, Rutherford decise di studiare le interazioni delle particelle alfa con la materia. Quelle particelle erano già state identificate come atomi di elio privi dei loro elettroni: sostanzialmente, piccole palle massicce di carica elettrica positiva. Si può prevedere che una particella alfa che passa attraverso un foglio sottile di materia venga leggermente deflessa, per le interazioni con gli atomi del materiale. Nel modello a panettone di Thomson, era previsto che la deflessione fosse molto piccola: il “panettone” diffuso avrebbe offerto ben poca resistenza alle particelle alfa ad alta velocità, e gli elettroni (le uvette nel panettone) avevano una massa troppo piccola per costituire una barriera significativa. Rutherford, con il suo assistente Hans Geiger, utilizzò una sorgente radioattiva per bombardare di particelle alfa fogli sottili d’oro (veniva utilizzato l’oro perché poteva essere martellato fino a ottenere uno spessore molto piccolo e molto preciso). Rutherford e Geiger sondavano la struttura interna degli atomi bombardandoli con particelle alfa.

Per gli esperimenti iniziali, Rutherford e Geiger cercarono particelle alfa deflesse direttamente dietro il foglio d’oro. I loro risultati indicavano che le particelle alfa venivano deflesse di un angolo di un grado, apparentemente confermando il modello di Thomson. Nel 1909 Rutherford suggerì un nuovo esperimento.

> Un giorno Geiger venne da me e disse: “Non pensa che il giovane Marsden, a cui sto insegnando i metodi radioattivi, debba iniziare una piccola ricerca?”. L’avevo pensato anch’io, perciò gli ho detto: “Perché non fargli cercare se sia possibile disperdere le particelle alfa a un angolo grande?”. Devo dire in confidenza che non credevo fosse

> possibile, perché sapevamo che la particella alfa è una particella massiccia molto veloce, con una grande quantità di energia e si può mostrare che, se lo scattering fosse dovuta all'effetto cumulativo di molti piccoli scattering, la possibilità che una particella alfa venga deflessa indietro è molto piccola. Poi ricordo che, due o tre giorni più tardi, Geiger arrivò da me tutto entusiasta, dicendo: "Siamo riusciti ad avere alcune particelle alfa che tornano indietro…". Era l'evento più incredibile che mi sia mai capitato in tutta la vita. Era incredibile quasi come sparare un proiettile da 15 pollici a un pezzo di carta e vederlo tornare indietro a colpirci.[16]

Secondo il modello a panettone dell'atomo, nessuna particella alfa doveva venire riflessa indietro. Rutherford si mise a riflettere sui dati sperimentali, fece qualche calcolo e concluse che le particelle alfa che tornavano indietro erano possibili solo se l'atomo fosse stato costituito da un nucleo positivo piccolo e molto pesante, attorno al quale presumibilmente orbitavano gli elettroni. L'idea originale di Perrin di un atomo planetario, con un nucleo positivo nel ruolo di sole, circondato da elettroni nel ruolo di pianeti, sembrava essere stato rivalutato. Perrin però, cortesemente e correttamente, diede pieno credito a Rutherford. Nel discorso di accettazione del premio Nobel nel 1926, disse:

> Credo di essere stato il primo a ipotizzare che l'atomo avesse una struttura che ricordava quella del sistema solare, in cui gli elettroni "planetari" ruotano attorno a un "Sole" positivo e l'attrazione esercitata dal centro è controbilanciata dalla forza d'inerzia (1901). Ma non ho mai tentato, e non ho mai nemmeno visto qualche modo per verificare quell'idea. Rutherford (che senza dubbio c'è arrivato in modo indipendente, ma ha anche avuto la cortesia di fare riferimento alla breve frase in cui l'ho formulata durante una conferenza) ha capito che la differenza essenziale fra la sua concezione e quella di J.J. Thomson era che, accanto al Sole positivo e quasi puntiforme, esistevano campi elettrici enormi, al confronto con quelli che esisterebbero all'interno o all'esterno di una sfera positiva omogenea con la stessa carica, ma che abbracciasse tutto l'atomo.[17]

Con la scoperta di Rutherford, e la sua successiva pubblicazione nel 1911, era iniziata una nuova epoca per la fisica atomica[18]. Non c'erano più dubbi sulla struttura generale dell'atomo: era costituito da un nucleo piccolo, pesante e con carica positiva, circondato da elettroni

orbitanti. Presto si sarebbe stabilito che anche il nucleo era a sua volta costituito da molte particelle densamente impaccate: la radioattività poteva essere spiegata con la disintegrazione di nuclei più pesanti. L'atomo di Rutherford, però, con gli elettroni che orbitavano rapidamente intorno al nucleo, ha riportato alla domanda a cui Ehrenfest aveva cercato di dare risposta: perché un atomo non emette radiazione?

Sarebbero stati necessari parecchi anni per risolvere il problema, e la risposta alla domanda si sarebbe trovata in qualcosa che nessuno dei primi inventori di modelli dell'atomo aveva preso in considerazione: un sistema di fisica del tutto nuovo, quella che oggi chiamiamo teoria quantistica. La fisica quantistica avrebbe reso non necessaria la soluzione di Ehrenfest per spiegare la struttura dell'atomo, ma quella soluzione sarebbe stata riportata in vita anni dopo, per cercare di confutare proprio quella stessa fisica quantistica.

---

1 Newton, *Opticks*, p. 394.

2 Nash, "Origin of Dalton's Chemical Atomic Theory".

3 Faraday, "XXIII. Speculation Touching Electric Conduction".

4 La repubblica di Ragusa era una piccola nazione in quella che oggi è la Croazia; è esistita dal 1358 al 1808, quando fu conquistata da Napoleone e annessa al suo impero. No, non lo sapevo: ho dovuto cercare anch'io queste informazioni.

5 Perrin, "Hypothèses moléculaires", p. 460.

6 Thomson, "XXIV. Structure of the Atom".

7 Nagaoka, "Kinetics of a System of Particles".

8 Rayleigh, "Electrical Vibrations".

9 Jeans, "Constitution of the Atom".

10 Schott, "Electron Theory of Matter".

11 Einstein, "Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen".

12 Lenard, "Über die Absorption der Kathodenstrahlen verschiedener Geschwindigkeit".

13 Stark, *Prinzipien der Atomdynamik*.

14 Ehrenfest, “Ungleichförmige Elektrizitätsbewegungen ohne Magnet- und Strahlungsfeld”.

15 Fa una certa impressione sapere che Rutherford vinse un premio Nobel *prima* di scoprire il nucleo atomico.

16 Rutherford, “Forty Years of Physics”, p. 68.

17 Perrin, “Nobel Lecture”.

18 Rutherford, “Scattering of α and β Particles by Matter”.

Capitolo 10

L'ultimo dei grandi scettici

> Ho una modifica di quel primo rozzo scudo che circonda completamente il mio corpo. È veramente un reticolo metallico flessibile e ventilato, non molto pesante, con interstizi così fini che l'occhio umano non può vederli. Posso respirare comodamente, perspirare normalmente e spostarmi liberamente. Ma non puoi vedere né me né il mio vestito di rete. La rete porta una certa leggera corrente elettrica, da batterie speciali alla cintola, che mette in circolazione i fotoni di luce quando arrivano. Per esempio, un fotone che colpisca la mia schiena viene spedito attraverso il mio corpo fino davanti, e da lì viene irradiato – come se non fossi mai stato sulla sua strada.
> E questo è il motivo per cui sono invisibile, perché la luce mi attraversa, ancora più perfettamente di quanto penetri il vetro.
> – Eando Binder, *The Invisible Robinhood* (1939)

I semi di un nuovo tipo di fisica erano stati piantati anni prima che Rutherford scoprisse il nucleo atomico. A partire dalla metà dell'Ottocento, gli scienziati studiavano l'emissione di luce da parte di corpi riscaldati all'incandescenza, come il Sole, le stelle e gli elementi di una cucina elettrica. Si era capito presto che tutti i corpi di questa forma possedevano uno spettro di emissione nel complesso simile; un esempio si può vedere nella curva superiore dello schizzo di Joseph von Fraunhofer dello spettro solare, che riporta la luminosità del Sole in funzione della lunghezza d'onda. Questo spettro di emissione, trascurando le linee scure dovute all'assorbimento di elementi specifici, presentavano una forma universale, dipendente solo dalla temperatura dell'oggetto. Il picco della curva si sposta verso lunghezze d'onda più corte al crescere della temperatura. Un oggetto portato al

“calor rosso” è quindi un oggetto a temperatura inferiore di un oggetto al “calor bianco”.

Per capire questo spettro di emissione termica, i fisici immaginarono un oggetto ipotetico in grado di assorbire perfettamente ogni radiazione incidente, un “corpo nero”, e poi tentarono di calcolare come quell’oggetto avrebbe riemesso radiazione elettromagnetica. Molti cercarono di derivare lo spettro di emissione di un corpo nero dai principi fondamentali della fisica, ma per la maggior parte del XIX secolo non riuscirono a trovare una soluzione che corrispondesse esattamente ai risultati sperimentali.

Verso la fine del secolo, la soluzione fu trovata infine dal fisico teorico tedesco Max Planck (1858-1947), allora professore a Berlino. Planck fece progressi affrontando il problema in direzione opposta rispetto ai suoi contemporanei. Mentre altri erano partiti dai principi fisici fondamentali e avevano cercato di derivarne la forma matematica dello spettro di corpo nero, Planck prima cercò una forma matematica per lo spettro, in accordo con i dati sperimentali, poi cercò una teoria fisica che producesse quel risultato matematico.

Planck iniziò il suo lavoro sulla radiazione di corpo nero nel 1894; nel 1900, aveva sviluppato una formula per lo spettro del corpo nero che non solo corrispondeva ai dati sperimentali, ma vi corrispondeva perfettamente. Aveva trovato la risposta corretta al problema, ma non aveva idea di come derivare quella risposta.

I tentativi iniziali di Planck di spiegare i propri risultati con la fisica nota al tempo furono fallimentari. Un corpo nero può essere considerato la combinazione di due sistemi che interagiscono fra loro: un insieme di “oscillatori”, presumibilmente atomi, che vibrano ed emettono radiazione elettromagnetica, e la radiazione elettromagnetica stessa, che può essere riassorbita dagli atomi. Utilizzando la teoria ondulatoria dell’elettromagnetismo di Maxwell, Planck previde che

tutta l'energia degli atomi si sarebbe dovuta convertire inevitabilmente in onde elettromagnetiche, lasciando la materia fredda e svuotata. Il che però era completamente in disaccordo con quello che poteva vedere negli esperimenti. Con il senno di poi, è significativo che il problema di Planck fosse molto simile alla difficoltà che incontravano i fisici dell'epoca nello spiegare perché un atomo non irradi immediatamente tutta la propria energia sotto forma di onde elettromagnetiche; senza saperlo, Planck avrebbe fatto il primo passo per risolvere entrambi i problemi.

Trovò infine una soluzione facendo un'ipotesi senza precedenti in merito agli atomi vibranti del corpo nero: assunse che potessero emettere energia elettromagnetica solo in quantità discrete, che chiamò *quanti*, e che l'unità fondamentale di un quanto fosse direttamente proporzionale alla frequenza dell'onda elettromagnetica. Come avrebbe scritto lo stesso Planck anni più tardi:

> Detto in poche parole, quello che feci si può descrivere semplicemente come un atto disperato. Per natura ho un'indole pacifica e respingo tutte le avventure dubbie. A quel punto però avevo lottato senza successo con il problema dell'equilibrio fra radiazione e materia e sapevo che era un problema di importanza fondamentale per la fisica; conoscevo anche la formula che esprime la distribuzione dell'energia nello spettro normale. Perciò bisognava trovare un'interpretazione teorica a qualsiasi costo, non importa quanto elevato.[1]

Planck sostanzialmente aveva introdotto una nuova fisica, compresa una nuova costante fondamentale della natura che nelle equazioni sarebbe stata indicata con il simbolo h e sarebbe stata chiamata costante di Planck. Un quanto di energia per una data frequenza, quindi, sarebbe stato pari alla costante di Planck moltiplicata per la frequenza. Indicando l'energia con E e la frequenza con la lettera greca ν, l'equazione per un quanto di energia luminosa è quindi $E = h\nu$[2].

Planck stesso non aveva considerato quella svolta come l'alba di una nuova epoca per la fisica: a proposito dei suoi nuovi quanti di energia, commentava: "Era semplicemente un'ipotesi formale e

davvero non ci ho pensato molto, tranne che, a qualunque costo, dovevo riuscire a ottenere un risultato positivo”[3].

La soluzione di un altro rompicapo della fisica del XIX secolo avrebbe cambiato drasticamente questo modo di vedere il lavoro di Planck. Il rompicapo era quello che oggi è noto come effetto fotoelettrico: era stato scoperto nel 1887 da Heinrich Hertz mentre conduceva esperimenti per verificare la previsione, avanzata da Maxwell, delle onde elettromagnetiche. Per rilevare le onde, Hertz utilizzò un’antenna a filo con uno spazio al centro, chiamato *spark gap* (“intervallo di scintilla”); le onde in arrivo avrebbero indotto nel filo una corrente elettrica, e questa avrebbe provocato una scintilla in quell’intervallo. Per vedere meglio la scintilla, Hertz collocò l’antenna in una scatola oscurata; con sua sorpresa, le scintille diventarono più deboli. Ulteriori studi mostrarono che la maggiore intensità delle scintille era dovuta all’esposizione alla luce ultravioletta: liberava elettroni dalla superficie del metallo che illuminava.

Questo risultato forse non era tanto sorprendente in sé; si sapeva bene a quel punto che le onde elettromagnetiche trasportano energia e quantità di moto, ed era ragionevole aspettarsi che quelle onde potessero fornire abbastanza energia da liberare elettroni da una superficie metallica. Ulteriori esperimenti condotti da Philipp Lenard nel 1902, però, mostrarono che l’effetto fotoelettrico aveva proprietà che non si potevano spiegare facilmente con la teoria ondulatoria della luce[4]. Lenard misurò la velocità degli elettroni emessi dalla superficie del metallo e scoprì che era indipendente dall’intensità della radiazione ultravioletta utilizzata. Scoprì inoltre che la velocità degli elettroni dipende dalla frequenza della luce utilizzata: a frequenze più elevate corrispondono elettroni più veloci. In base alla teoria ondulatoria, ci si aspettava che la velocità degli elettroni dipendesse dall’intensità della luce, perché maggiore sarebbe stata l’energia che poteva imprimere

agli elettroni. Ci si aspettava inoltre che la velocità degli elettroni non dipendesse affatto dalla frequenza della luce. Lenard e altri fisici avevano difficoltà a trovare una teoria ondulatoria che potesse spiegare le curiose proprietà dell'effetto fotoelettrico.

La spiegazione fu trovata e pubblicata da Albert Einstein nel 1905, e avrebbe rivoluzionato la nostra concezione della luce e della materia. Il suo articolo (il cui titolo, tradotto in italiano, era "Un punto di vita euristico sulla produzione e la trasformazione della luce") fu il primo di tre articoli fondamentali che Einstein pubblicò in quell'anno[5]. Il secondo, come abbiamo già visto, conteneva una spiegazione del moto browniano; il terzo avrebbe presentato la sua teoria della relatività speciale, di cui parleremo più avanti.

Con la sua spiegazione dell'effetto fotoelettrico, Einstein operò una revisione di cento anni di riflessioni sulla natura della luce. Mentre Thomas Young aveva dimostrato che la luce si comporta come un'onda, Einstein sostenne che l'effetto fotoelettrico può essere spiegato più facilmente se la luce si comporta anche come una particella. In particolare, postulava che i quanti di luce introdotti da Planck non fossero solo un espediente matematico, ma una proprietà fondamentale della luce. Le particelle di luce alla fine sarebbero state chiamate fotoni. Nell'effetto fotoelettrico, i singoli elettroni sono staccati da una superficie metallica a opera di singoli fotoni. Si possono pensare gli elettroni come palle su un tavolo da biliardo e un fotone come la palla che viene colpita dalla stecca, entra in collisione con le altre e le mette in movimento. Poiché l'energia del fotone dipende dalla sua frequenza d'onda, un fotone di frequenza più elevata espelle un elettrone a velocità più elevata. Dato che solo un fotone singolo interagisce con ciascun elettrone, l'intensità della luce (il numero dei fotoni) incide solo sul numero degli elettroni espulsi, non sulla loro velocità.

Einstein non sosteneva che la luce agisse solo come una particella, come aveva fatto Newton duecento anni prima: sosteneva invece che la luce ha caratteristiche sia di onda *sia* di particella, comportandosi a volte come un'onda e in altri casi come una particella. Quando si propaga nello spazio o all'interno di un mezzo, viaggia come un'onda; quando viene assorbita da un rilevatore, viene assorbita come una particella localizzata. Questo dualismo onda-corpuscolo è un concetto base della fisica quantistica e i fisici continuano ancora oggi a discutere su che cosa, esattamente, significhi[6].

La fisica dell'effetto fotoelettrico sarebbe stata curiosamente utilizzata in una peculiare spiegazione fantascientifica dell'invisibilità. Nel racconto *The Invisible Robinhood* (1939) di Eando Binder (pseudonimo di Earl AND Otto Binder), un supereroe crea una tuta di metallo che usa l'elettricità per far passare i fotoni da una parte all'altra, rendendo invisibile chi la indossa. L'effetto fotoelettrico non è citato esplicitamente, ma l'influenza è innegabile.

L'ipotesi di Einstein dell'esistenza di quanti di luce non fu accettata facilmente. Le equazioni matematiche presentate da Einstein erano in buon accordo con i dati sperimentali, ma il suo impiego della nuova fisica fu considerato troppo radicale da molti fra i fisici più eminenti dell'epoca. L'elenco degli scettici comprendeva Max Planck, che per primo aveva introdotto i quanti di luce. L'atteggiamento generale è colto bene da quanto scriveva Robert Millikan nel 1916.

> Fu nel 1905 che Einstein compì il primo abbinamento dell'effetto fotoelettrico con una forma di teoria quantistica, formulando l'ipotesi coraggiosa, per non dire temeraria, di un corpuscolo di luce elettromagnetica di energia hv, che veniva trasferito a un elettrone all'assorbimento. Questa ipotesi si può definire temeraria in primo luogo perché una perturbazione elettromagnetica che rimane localizzata nello spazio sembra una violazione del concetto stesso di perturbazione elettromagnetica, e in secondo luogo perché contrasta completamente con i fatti ampiamente stabiliti dell'interferenza.[7]

In sintesi: la teoria ondulatoria della luce era stata ampiamente confermata nel corso degli ultimi cento anni, e l'idea della luce come

particella localizzata sembrava in completa contraddizione con quella della luce come onda non localizzata. Per la maggior parte dei fisici, l'introduzione della nuova fisica creava più problemi che soluzioni.

Uno scienziato, invece, era disposto a fare il salto e andare anche oltre Einstein: era il fisico danese Niels Bohr. Nato a Copenhagen nel 1885, Bohr si era iscritto all'Università di quella città nel 1903, dove suo padre era professore di fisiologia. Si mise presto in luce, vincendo la medaglia d'oro in una gara indetta dalla Reale accademia danese di scienze e lettere nel 1905. Il problema proposto per la gara era quello di trovare un metodo per misurare la tensione superficiale dei liquidi e Bohr svolse gli esperimenti nel laboratorio del padre, perché la facoltà di fisica dell'Università non aveva un proprio laboratorio.

Bohr continuò gli studi a Copenhagen fino a ottenere la laurea e, nel 1911, il dottorato, con una tesi sul comportamento degli elettroni nei metalli. Poi, grazie a una borsa di studio, si recò in Inghilterra in quello stesso anno ed ebbe modo di incontrare alcuni scienziati importanti, fra cui J.J. Thomson, lo scopritore dell'elettrone. Evidentemente non fece una grande impressione su Thomson, ma incontrò anche Ernest Rutherford, che lo invitò a lavorare per un po' a Manchester. Rutherford aveva da poco scoperto l'esistenza del nucleo atomico e Bohr si ritrovò perciò al centro dell'attività di studio della struttura dell'atomo.

Tornò in Danimarca nel 1912, sempre molto interessato agli atomi. Divenne lettore all'Università di Copenhagen in quello stesso anno e nel 1913 ottenne un incarico come professore associato. Alla metà del 1913 aveva già formulato un nuovo modello per la struttura atomica, che pubblicò in tre articoli (la cosiddetta "trilogia") nei mesi di luglio, settembre e novembre di quell'anno.

I ricercatori precedenti, di fronte alla scelta fra mantenere l'atomo con nucleo di Rutherford oppure l'elettromagnetismo classico,

avevano optato per conservare l’elettromagnetismo e cercare altri modelli atomici. In fin dei conti, la fisica classica prevedeva che un atomo a sistema planetario come quello di Rutherford avrebbe dovuto irradiare tutta la propria energia in un arco di tempo brevissimo. Nel suo primo articolo, Bohr faceva la scelta opposta: sosteneva che l’idea di Rutherford era corretta e che le leggi dell’elettromagnetismo dovevano essere diverse per oggetti di piccole dimensioni come un atomo[8].

Bohr fece poi due ipotesi fondamentali: (1) la luce viene emessa e assorbita dagli elettroni che orbitano nell’atomo sotto forma dei corpuscoli discreti (fotoni) previsti da Einstein; e (2) un elettrone può seguire solo orbite speciali poste a distanze ben definite rispetto al nucleo. Bohr definiva “stati stazionari” quelle orbite, nel senso che dovevano essere posizioni stabili per il moto degli elettroni. Un atomo in uno di quegli stati non avrebbe emesso radiazione luminosa come prediceva la teoria di Maxwell.

Bohr sostenne che gli elettroni possono solo “saltare” da un’orbita speciale all’altra; se scendono da un’orbita a una più interna, rilasceranno un fotone. L’energia del fotone, e quindi la sua frequenza, è determinata da quanta energia l’elettrone cede nell’effettuare la transizione. Un atomo può anche assorbire un fotone di frequenza appropriata, che provocherà il salto di un elettrone da un’orbita interna a una più esterna (Figura 10.1).
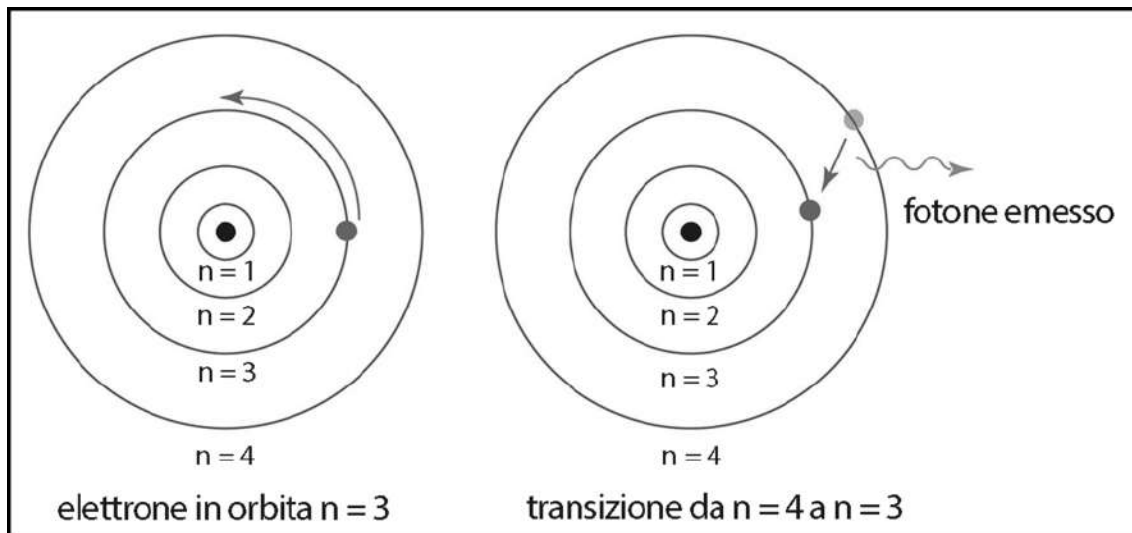
Figura 10.1 Il modello dell'atomo di Niels Bohr. Gli elettroni orbitano a distanze fisse, indicate da un numero "n". Quando saltano da un'orbita esterna a una più interna emettono un fotone.

Qual è l'origine di queste orbite speciali? Bohr sostenne che il momento angolare dell'elettrone in orbita attorno al nucleo, il suo momento di rotazione, può assumere solo valori discreti, come la luce di una data frequenza può avere energie solo pari a multipli discreti di $E=h\nu$. Bohr, in sostanza, sosteneva che non solo l'energia della luce è quantizzata (può assumere solo valori discreti), ma che è quantizzato anche il momento angolare degli elettroni. Un singolo quanto di momento angolare è dato dalla costante h di Planck, il che indica che tanto l'atomo di Bohr quanto i fotoni di Einstein sono legati alla stessa nuova fisica fondamentale.

Come si può vedere, il modello di Bohr era basato su molte ipotesi, e sarebbe stato facile liquidarlo senza troppi pensieri, tranne per un particolare: corrispondeva quasi alla perfezione alle formule di Balmer e Rydberg per l'emissione di luce da parte di un atomo di idrogeno. La scoperta di Bohr spazzò via molta resistenza all'idea che fosse necessario usare la nuova fisica per spiegare l'atomo; nel 1922 avrebbe vinto il premio Nobel per la fisica per i suoi risultati.

Rimaneva aperto un interrogativo concettuale: perché il momento angolare degli elettroni è quantizzato, o, più in generale, perché gli elettroni hanno stati stazionari? La spiegazione sarebbe stata presentata dal fisico francese Louis de Broglie nel 1924, nella tesi di dottorato. De Broglie, di famiglia aristocratica, era nato nel 1892 ed era intenzionato a dedicarsi alle discipline umanistiche, ma fu attratto invece dalla fisica, per il lavoro del fratello Maurice, un fisico che studiava i raggi X. De Broglie ottenne la laurea in fisica nel 1913 e fu poi arruolato nel 1914 per la Prima guerra mondiale, durante la quale lavorò allo sviluppo delle comunicazioni radio per l'esercito. Congedato nel 1919, tornò immediatamente ai problemi di fisica che la guerra gli aveva impedito di continuare a studiare, con l'obiettivo di ottenere un dottorato presso l'Università di Parigi.

Nei primi lavori con il fratello Maurice, Louis de Broglie aveva studiato l'effetto fotoelettrico e le proprietà dei raggi X. Grazie all'effetto fotoelettrico, era ben consapevole dell'esistenza dei fotoni e del dualismo onda-corpuscolo della luce. Come avevano osservato molti altri prima di lui, de Broglie notò inoltre che i raggi X, onde elettromagnetiche, si comportano in modo molto simile a corpuscoli, per la loro cortissima lunghezza d'onda. Questa osservazione gli fece imboccare una strada rivoluzionaria: come la luce può essere considerata un'onda con proprietà simili a quelle di una particella, immaginò che la materia potesse essere costituita da particelle che possiedono proprietà simili a quelle delle onde. Se la lunghezza d'onda di un elettrone è molto piccola, nella maggior parte dei casi si comporterà come una particella. Come avrebbe riflettuto più avanti nel 1929 nella sua Nobel Lecture, "D'altra parte la determinazione dei moti stabili degli elettroni nell'atomo coinvolge numeri interi, e fino a quel momento gli unici fenomeni in cui in fisica erano coinvolti numeri interi erano quelli dell'interferenza e delle frequenze naturali.

Questo mi ha fatto pensare che anche gli elettroni non potessero essere rappresentati come semplici corpuscoli, ma che anche a essi si dovesse attribuire una periodicità”[9].De Broglie immaginava l’elettrone come una vibrazione che si propagava intorno alla circonferenza dell’atomo. In un organo a canne, Young aveva osservato che solo certe onde con lunghezze d’onda specifiche possono “stare esattamente” nella canna; analogamente, immaginava de Broglie, l’onda-elettrone può seguire solo certi percorsi circolari attorno al nucleo. Grazie a questa idea, de Broglie riuscì a derivare la condizione di momento angolare delle orbite degli elettroni, che Bohr aveva semplicemente postulato (Figura 10.2). Discusse la sua tesi di dottorato nel 1924 e nel 1927 esperimenti di interferenza dimostrarono le proprietà ondulatorie dell’elettrone. Era ormai iniziata l’epoca della fisica quantistica: a quel punto si era capito che tutto in natura, la luce come la materia, presenta questo dualismo fra onda e corpuscolo.
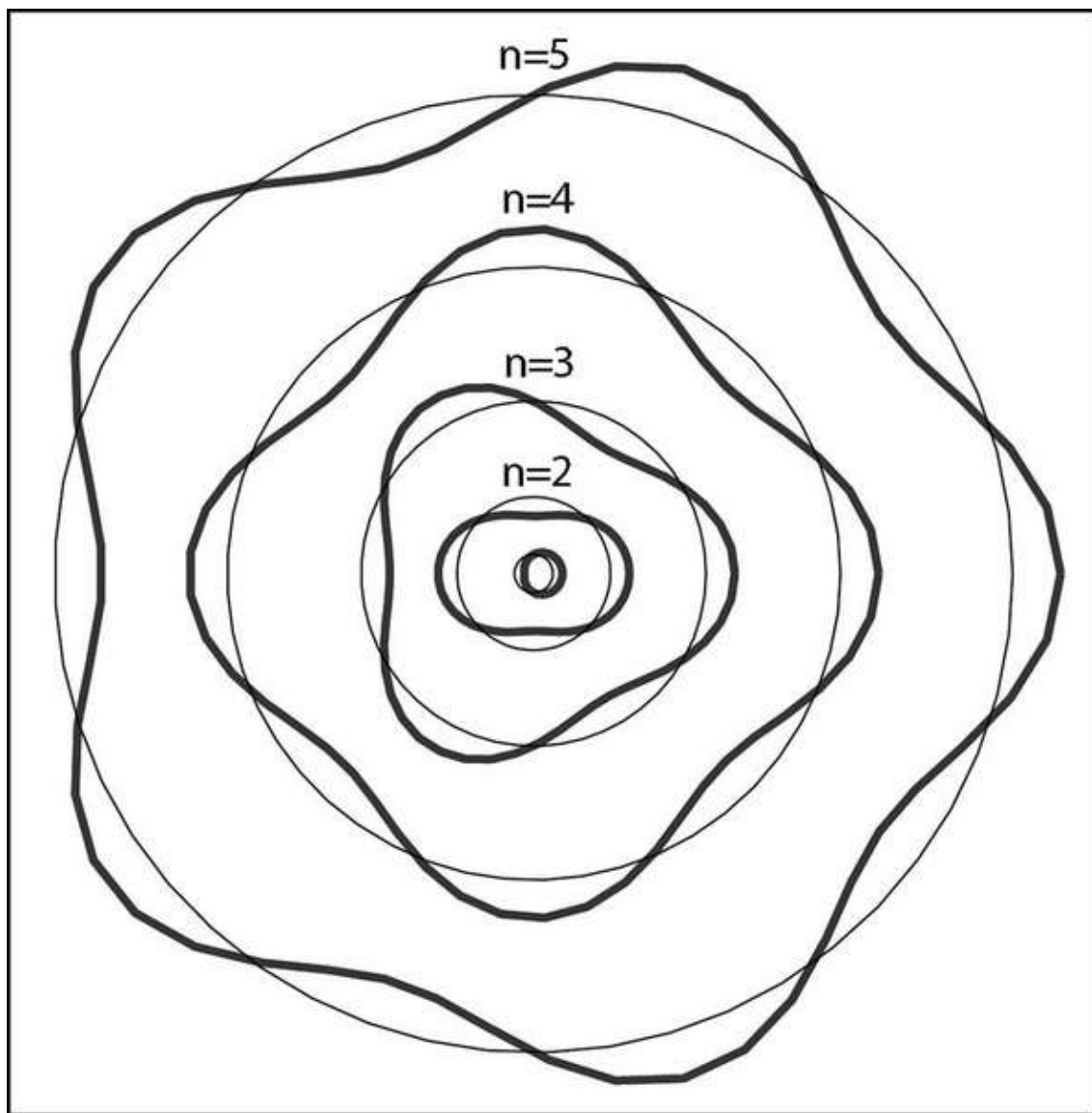
Figura 10.2 Onde elettroniche di Louis de Broglie attorno alla circonferenza dell'atomo, di ordini diversi, individuate da un numero "n".

La nuova teoria quantistica dava finalmente una risposta alla domanda che aveva lasciato lungamente perplessi i fisici: perché l'elettrone non emette radiazione orbitando attorno al nucleo? La risposta è che un elettrone in uno dei suoi stati stazionari non orbita affatto; a tutti gli effetti è una nuvola diffusa che racchiude il nucleo e che non si muove – un'onda stazionaria, come le onde sonore in una

canna d’organo. L’ipotesi di Ehrenfest di oscillazioni senza radiazione di cariche elettriche non era affatto necessaria, nella teoria quantistica.

Come accade per tutte le nuove teorie, anche nei confronti della fisica quantistica sono stati molti gli scettici, inizialmente. I primi lavori si basavano su molte ipotesi (luce quantizzata, orbite stazionarie e così via) che secondo molti ponevano alla fisica più problemi di quelli che risolvevano[10]. Con il proseguire delle ricerche, e grazie a risultati sempre più precisi, la maggior parte degli scettici dovette cambiare idea, vista la quantità crescente di prove sperimentali e di argomentazioni teoriche a sostegno della teoria quantistica. Anche dopo il lavoro di de Broglie rimanevano molte domande aperte (alcune rimangono ancora oggi), ma la maggior parte dei fisici adottò la nuova, rivoluzionaria concezione di luce e materia[11].

Almeno uno scienziato sarebbe rimasto non convinto della realtà della fisica quantistica. Il fisico e matematico inglese George Adolphus Schott (1868-1937) avrebbe passato gran parte della propria carriera a cercare di dimostrare la possibilità di utilizzare la teoria classica dell’elettromagnetismo di Maxwell per derivare tutte le proprietà osservate degli atomi. Non ebbe successo in questo suo tentativo, ma sviluppò nuovi risultati teorici relativi ai moti senza radiazione di Ehrenfest, che avrebbero portato i fisici più vicini a pensare alla possibilità dell’invisibilità.

Si sa poco dei primi anni di Schott: nato a Bradford, in Inghilterra, vi compì gli studi fino al 1886, quando si trasferì a Cambridge, al Trinity College. Ottenuta la laurea nel 1890, nel 1893 divenne lettore di fisica all’University College of Wales di Aberystwyth. Dimostrò subito un interesse per la teoria dell’elettromagnetismo e il suo primo articolo scientifico fu dedicato, nel 1894, alla riflessione e alla rifrazione della luce[12].

Come abbiamo visto, Schott era stato coinvolto dalla mania per la speculazione sulla struttura dell'atomo che aveva contagiato la comunità scientifica nel 1903. Un articolo del 1906 che proponeva un elettrone in espansione fu la sua seconda pubblicazione. Continuò a studiare il proprio modello atomico e anche altri per il resto del decennio, concentrando gran parte della sua attenzione su come un atomo possa rimanere stabile senza emettere radiazione. In un articolo del 1907, mentre discuteva come gli atomi possano essere costituiti da anelli diversi di elettroni orbitanti a distanze diverse dal centro, fece questa significativa affermazione: "Due gruppi qualsiasi, in conseguenza del loro moto permanente, si disturbano a vicenda ed emettono onde, la cui energia diminuisce l'energia dei gruppi; perciò, il sistema non è permanente. La riduzione di energia, e il conseguente cambiamento di struttura, può procedere con estrema lentezza, purché tutte le onde più potenti dovute alle perturbazioni vengano distrutte per interferenza fra i vari elettroni di ciascun gruppo"[13]. Nel suo famoso esperimento, Thomas Young aveva dimostrato che la luce proveniente da due fenditure può interferire e che a un certo punto le due onde possono cancellarsi a vicenda, nel fenomeno dell'interferenza distruttiva. Analogamente, Schott ipotizzava che le onde emesse da due anelli di elettroni orbitanti potessero cancellarsi a vicenda in gran parte, se non completamente, facendo sì che l'atomo emettesse poca o nessuna radiazione. Ipotizzava un tipo di interferenza che non si era mai visto in precedenza, e non aveva la matematica che sostenesse la sua intuizione, ma stava avvicinandosi a una scoperta davvero notevole, come vedremo.

Schott si guadagnò la fama scientifica con i suoi studi matematici dettagliati della radiazione elettronica, mettendosi rapidamente in luce come grande esperto dell'argomento. Per i suoi interessi e le competenze sugli aspetti matematici del problema, divenne professore

di matematica ad Aberystwyth e nel 1910 fu promosso a presidente del dipartimento di matematica.

Dopo tutti gli sforzi di Schott di comprendere la struttura atomica attraverso la teoria elettromagnetica, il modello di Bohr del 1913 probabilmente fu uno shock. A Schott l'introduzione di una teoria della materia completamente nuova apparve problematica, e passò il resto della vita a cercare di dimostrare che le curiose proprietà dell'atomo, in particolare le orbite senza radiazione di Bohr, potevano essere spiegate completamente con la teoria di Maxwell. Come avrebbe detto di quella teoria, in un articolo pubblicato nel 1918, "Senza dubbio nessuno sarà disposto a rinunciare a una teoria utile come questa, finché non ve ne saranno motivi molto più validi". Va notato che non negava la validità del lavoro di Bohr, poiché considerava i suoi risultati "tanto straordinariamente esatti che difficilmente si potrebbe negarvi un substrato considerevole di verità"[14].

Mentre il consenso crescente fra i ricercatori e le evidenze scientifiche indicavano che la nuova fisica era essenziale per spiegare la struttura dell'atomo, Schott continuò tranquillamente a cercare di derivare orbite senza radiazione con la teoria ondulatoria classica. Questo lavoro finì per diventare piuttosto un progetto collaterale, perché i suoi impegni universitari diventarono più pressanti: nel 1923 diventò responsabile di entrambi i dipartimenti di matematica, pura e applicata, e nel 1932 divenne vice-rettore del college.

Infine, nel 1933, l'anno del pensionamento, Schott pubblicò un risultato notevole, in un articolo intitolato "The Electromagnetic Field of a Moving Uniformly and Rigidly Electrified Sphere and Its Radiationless Orbits"[15]. Aveva fatto quello che quasi tutti consideravano impossibile: aveva trovato una soluzione delle equazioni di Maxwell per cui una distribuzione di carica elettrica accelera senza produrre radiazione.

Schott immaginò una sfera cava, rivestita uniformemente con uno strato sottile di carica elettrica, per esempio “una sfera metallica sospesa grazie a un sottile filo metallico in modo tale che possa essere messa a terra o isolata a piacere”[16]. Immaginò la sfera in moto periodico, che seguiva un percorso arbitrario nel suo periodo: poteva spostarsi in cerchio, secondo una figura a otto, o anche seguendo tracciati più complessi. Con calcoli matematici estremamente dettagliati, Schott dimostrò che una sfera del genere non produce radiazione elettromagnetica se oscilla con una di un insieme di frequenze discrete. Quelle frequenze non corrispondevano agli stati stazionari dell’atomo di idrogeno e quindi non potevano essere usate per creare un modello dell’atomo, ma Schott aveva sostanzialmente dimostrato quello che si era proposto: le cariche elettriche possono oscillare senza emettere radiazione. A queste strutture curiose alla fine sarebbe stato attribuito il nome di sorgenti non radianti: sono, paradossalmente, sorgenti di radiazione che in effetti non producono alcuna radiazione.

Ma qual è l’origine di questo moto senza radiazione? Schott non forniva alcuna spiegazione specifica, ma nella matematica del suo risultato è implicito un indizio. Il calcolo di Schott mostrava che la sfera in movimento non produce radiazione se il periodo della sua oscillazione (cioè il tempo che impiega a compiere un percorso completo) è un multiplo del tempo necessario alla luce per percorrere il diametro della sfera. Questo fa pensare che l’onda di luce generata a un’estremità della sfera viaggi fino a raggiungere la luce emessa all’altra estremità della sfera e le due onde si cancellino a vicenda. Abbiamo di nuovo un fenomeno di interferenza fra onde, ma di una forma molto particolare. Nell’esperimento di Young, le luci emesse da due punti interferiranno distruttivamente in alcune posizioni e costruttivamente in altre. Schott aveva scoperto che è possibile creare

una distribuzione in movimento di cariche elettriche (un grande insieme di punti che emettono luce) in cui le onde combinate emesse da tutti i punti interferiscono distruttivamente completamente e ovunque all'esterno della regione in cui le cariche sono in movimento.

Si tratta di un risultato davvero molto strano. Tutta la nostra tecnologia delle comunicazoni senza fili (radio, cellulari, Wi-Fi) si basa sul principio che cariche oscillanti creano onde elettromagnetiche. Il risultato di Schott suggerisce che sia possibile, per esempio, progettare un telefono cellulare con una certa forma che non emetta onde quando si fa una chiamata: tutta l'energia rimarrebbe localizzata nella regione del telefono stesso.

Nella fantascienza, solo un autore sembra essersi avvicinato all'uso dell'interferenza distruttiva come strumento per l'invisibilità. Nel romanzo *Slan* (1946) di A.E. van Vogt, il protagonista usa una tecnologia di disintegrazione per annichilire qualsiasi fotone interagisca con la sua nave spaziale, rendendola a tutti gli effetti invisibile.

Il risultato di Schott aveva i suoi limiti. La condizione per le orbite senza radiazione che aveva derivato richiede che il raggio della sfera sia molto maggiore della lunghezza del percorso che la sfera segue: si potrebbe dire che il moto della sfera segua più una "fluttuazione" che un'"orbita". Il risultato era comunque straordinario, e Schott lavorò per il resto della vita a perfezionare la sua teoria, pubblicando nel 1936 e 1937 una serie di articoli sul moto delle sfere elettricamente cariche[17].

Lo stesso Schott ammetteva che il suo modello non poteva spiegare il modello dell'atomo di Bohr, e cercò di applicarlo ad altri rompicapo nella fisica fondamentale. Da quando Rutherford aveva scoperto il nucleo atomico, si era capito che il nucleo era a sua volta formato da particelle ancora più piccole. Una di queste era il protone, una particella con una carica positiva esattamente opposta a quella

dell’elettrone. Ogni elemento della tavola periodica è un atomo con un numero diverso di protoni. Nel 1932, il fisico inglese James Chadwick dimostrò sperimentalmente l’esistenza del neutrone, una particella di massa quasi uguale a quella del protone ma privo di carica elettrica. Nel suo articolo sui moti senza radiazione del 1933, Schott ipotizzava che il neutrone potesse rappresentare due dei suoi gusci orbitanti senza radiazione, uno positivo e uno negativo, che orbitavano uno intorno all’altro. L’idea però fu rapidamente messa da parte dai ricercatori che si occupavano di teoria nucleare.

Schott morì all’improvviso nel 1937, lasciando incompiuti i suoi studi sulla radiazione; i suoi ultimi articoli furono pubblicati postumi. Schott può essere considerato l’ultimo dei grandi scettici dei quanti, una delle ultime persone a mettere in dubbio gli assunti della teoria dei quanti prima che prove sperimentali schiaccianti della sua correttezza spazzassero via ogni ragionevole dubbio. Sarebbe stato ricordato con simpatia e rispettato per il suo lavoro, come si comprende dal suo necrologio per la Royal Society: “Le difficoltà matematiche sono enormi, e l’abilità mostrata nell’ottenere risultati numerici mette in luce l’estrema competenza di Schott. Lo si potrebbe definire l’attacco supremo di un difensore eroico prima della morte. Sconfitto? Chi può dirlo? Mi piace pensare che negli anni a venire il lavoro di Schott sarà sempre consultato per trarne ispirazione ad affrontare le difficoltà che si incontrano sul cammino di tutte le teorie”[18].

Leggendo gli articoli di Schott oggi, resto anch’io meravigliato dalla sua abilità nel manipolare le equazioni di Maxwell per produrre risultati eleganti. Schott era veramente un artista della teoria ondulatoria.

Nei decenni successivi, altri ricercatori avrebbero riscoperto in modo indipendente le orbite senza radiazione di Schott e, come lui, avrebbero incontrato difficoltà a trovare un uso per un risultato tanto

convincente. Nel 1948, i fisici quantistici David Bohm e Marvin Weinstein hanno scoperto tipi più generali di orbite senza radiazione e hanno dimostrato che è possibile che alcune di quelle distribuzioni di carica senza radiazione entrino automaticamente in oscillazione, senza che siano presenti forze esterne[19]. Possiamo immaginare uno di quei sistemi auto-oscillanti come una palla cava piena d'acqua, dove la palla è il guscio sferico della carica e l'acqua è l'energia elettromagnetica delle cariche. Scuotendo la palla piena d'acqua, possiamo metterla in moto vibrazionale, dove il moto interno dell'acqua è bilanciato dal moto esterno della palla. Analogamente, Bohm e Weinstein hanno immaginato che il moto del guscio e il moto dell'energia elettromagnetica nel guscio si bilanciassero a vicenda.

Al tempo di Bohm e Weinstein, la fisica del neutrone era ben stabilita, ma erano state scoperte nuove strane particelle per cui mancava una spiegazione. Nel 1947, i ricercatori Cecil Powell, César Lattes e Giuseppe Occhialini hanno scoperto particelle chiamate mesoni, la cui esistenza era stata prevista nel 1934 dal fisico giapponese Hideki Yukawa. Bohm e Weinstein hanno colto l'occasione per suggerire che forse, ma solo forse, i mesoni potevano essere stati eccitati del comune elettrone, in auto-oscillazione nel proprio campo elettrico, L'ipotesi è stata rapidamente scartata, con la scoperta di altre proprietà dei mesoni che non erano compatibili con un modello a elettrone eccitato.

Nel 1964, il professor George Goedecke della New Mexico State University ha ulteriormente generalizzato il lavoro di Bohm e Weinstein e ha suggerito coraggiosamente che i moti senza radiazione potrebbero essere utilizzati per costruire "una 'teoria della natura' in cui tutte le particelle (o gli aggregati) stabili siano semplicemente distribuzioni di corrente di carica non radiante le cui proprietà meccaniche siano di origine elettromagnetica"[20]. Anche questa ipotesi

non ha avuto seguito nella comunità scientifica, poiché le scoperte moderne nella fisica delle particelle hanno mostrato che le leggi fondamentali della fisica sono più complicate, e più strane, di quelle che può spiegare una semplice teoria elettromagnetica.

Gli esempi precedenti mostrano che i moti senza radiazione, alla metà del XX secolo, erano una soluzione alla ricerca di un problema. Molti ricercatori hanno esaminato le proprietà degne di nota di queste distribuzioni di carica e hanno avuto l'impressione che dovessero descrivere *qualcosa* nel mondo naturale, e hanno cercato di individuare un modo per utilizzarle nella fisica.

All'incirca allo stesso tempo in cui Goedecke si stava cimentando con questo problema, altri ricercatori stavano sviluppando nuove tecnologie che avrebbero reso importanti, in un contesto molto diverso, queste distribuzioni di carica "invisibili".

---

1 Nauenberg, "Max Planck", p. 715.

2 A Stephen Hawking una volta è stato detto che ogni equazione che avesse inserito in un libro di divulgazione scientifica ne avrebbe dimezzato le vendite. Sapendolo, mi scuso.

3 Nauenberg, "Max Planck", p. 715.

4 Wheaton, "Philipp Lenard".

5 Einstein, "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt".

6 Non preoccupatevi se l'idea del dualismo onda-corpuscolo non ha molto senso per voi; in effetti, i fisici stanno ancora oggi affannandosi a capire che cosa significhi esattamente questo dualismo.

7 Niaz et al., "History of the Photoelectric Effect", p. 909.

8 Bohr, "Constitution of Atoms and Molecules".

9 Broglie, "Wave Nature of the Electron".

10 Il mio referente di dottorato, Emil Wolf, una volta scherzando disse di uno dei suoi studenti che "causa più problemi di quelli che risolve". Non voleva essere offensivo, però: quello studente era così brillante che mentre risolveva un singolo problema scopriva regolarmente molte altre domande su cui indagare. È l'ideale per la scienza: rispondere a domande e intanto scoprire nuove domande a cui dare una risposta.

11 Agli studenti che iniziano a studiare la fisica quantistica spesso viene insegnato il mantra: “State zitti e calcolate”. In altre parole si dice loro di non preoccuparsi del perché la fisica funziona, ma di usarla semplicemente senza fare domande. È passato oltre un secolo da quando è iniziata l’epoca della fisica quantistica, ma ancora non sappiamo esattamente che cosa ci dica sulla natura dell’universo. Per prendere a prestito una frase da *L’ultima occasione*, di Douglas Adams e Mark Carwardine, “Era difficile non pensare che da qualche parte a qualcuno era sfuggito qualcosa. Ma non potevo nemmeno giurare che non fossi io a non aver capito bene” (p. 158).

12 Schott, “V. Reflection and Refraction of Light”.

13 Schott, “LIX. Radiation from Moving Systems of Electrons”, p. 667.

14 Schott, “XXII. Bohr’s Hypothesis of Stationary States of Motion”, pp. 258, 243.

15 Schott, “LIX. Electromagnetic Field of a Moving Uniformly and Rigidly Electrified Sphere”.

16 Ivi, pp. 752-53.

17 Schott, “Electromagnetic Field due to a Uniformly and Rigidly Electrified Sphere in Spinless Accelerated Motion and Its Mechanical Reaction on the Sphere”, I, II, III, IV.

18 Conway, “Professor G. A. Schott, 1868-1937”.

19 Bohm e Weinstein, “Self-Oscillations of a Charged Particle”.

20 Goedecke, “Classically Radiationless Motions”, p. B288.

Capitolo 11

Vedere dentro

> A giustificazione del piccolo errore di mister Bland va notato che non aveva né l'intenzione né la propensione a diventare uno scheletro. Un'impresa tanto ambiziosa non gli era mai passata per la mente. Le ossa, in numero stupefacente, gli furono buttate addosso, per così dire. O, viceversa, fu eliminata la carne. Sul lungo periodo il modo in cui si era verificato il cambiamento non faceva molta differenza. Bland scoprì all'improvviso, con sua grande perplessità, di essersi trasformato in uno scheletro. Scoprì anche che è ben raro l'individuo che considera uno scheletro un suo pari nella società o un compagno desiderabile.
> – Thorne Smith, *Skin and Bones* (1933)

La scoperta dei raggi X nel 1985 aveva prodotto non solo stupore e meraviglia, ma anche molta confusione e panico. Il panico era abbastanza significativo da spingere i giornalisti a sfatare alcuni dei presunti poteri dei nuovi raggi. Lo stesso articolo del 1896 che descrive "i raggi X che penetrano la biancheria intima e altre assurdità" inizia con questa descrizione dei limiti delle immagini ai raggi X: "Il pubblico preoccupato può tranquillizzarsi. Nessuno, neanche il signor Edison, può vedere i propri polmoni e il proprio fegato. Il massimo che si può fare è vedere un'ombra dello scheletro della mano o del piede – e, in fin dei conti, non è abbastanza meraviglioso da soddisfare chiunque? Anche questo però si può fare solo in condizioni speciali"[1].

Il "signor Edison" a cui alludeva il giornalista è il famoso inventore Thomas Edison, che ebbe una breve infatuazione per i raggi X quando furono scoperti, e arrivò a ipotizzare, senza alcuna giustificazione, che potessero curare la cecità[2]. Subito dopo la scoperta di Röntgen, Edison

incaricò il suo assistente, Clarence Madison Dally, di lavorare alla tecnologia dei raggi X; nel 1902, Dally aveva sviluppato un grave avvelenamento da radiazioni, che lo portò alla morte nel 1904: si pensa che sia stato la prima persona a morire per gli esperimenti con la radiazione. L'esperienza di Dally spinse Edison a cessare ogni ricerca sui raggi X; nel 1903 ebbe a dire: "Non parlatemi dei raggi X; ne ho paura"[3].

Nonostante i limiti e i pericoli, l'opinione pubblica ha continuato ad associare i raggi X all'invisibilità fino a buona parte del XX secolo, e tanto gli scrittori di fantascienza quanto i divulgatori scientifici se ne avvantaggiarono per ottenere attenzione. Per esempio, *Skin and Bones* (1933) di Thorne Smith è un romanzo umoristico in cui l'autore immagina che il protagonista senza volerlo si trasformi in uno scheletro sperimentando con le sostanze fluoroscopiche utilizzate nella fotografia a raggi X: "Non si saprà mai esattamente quale combinazione chimica abbia prodotto lo stupefacente cambiamento nella composizione fisica del signor Bland. È del tutto possibile che i fumi del suo strano intruglio, uniti a una dose eccessiva di aspirina, rafforzata dalla reazione con una grande quantità di alcol, siano stati sufficienti per creare un uomo fluoroscopico invece di una pellicola fluoroscopica"[4].

Nel campo della divulgazione, la copertina del numero di febbraio 1921 della rivista *Science and Invention* proponeva provocatoriamente la domanda: "Possiamo renderci invisibili?" e includeva l'immagine, ugualmente provocatoria, di una donna apparentemente cancellata da uno scienziato con un'apparecchiatura che sembra formata da una coppia di tubi a raggi catodici (Figura 11.1).

Figura 11.1 La copertina del numero di febbraio 1921 della rivista “Science and Invention”.

Autore dell’articolo era Hugo Gernsback, lussemburghese naturalizzato americano, scrittore, inventore ed editore di riviste, ricordato oggi soprattutto per avere fondato la prima rivista di fantascienza, *Amazing Stories*, nel 1926. Nel suo articolo sull’invisibilità non manca a sua volta di fare della fantascienza, immaginando un apparecchio futuro che superi i limiti dei raggi X e

consenta di ottenere immagini di tutte le parti del corpo umano, non solo delle ossa ma anche dei tessuti.

> Quale sarà l'uso pratico della futura macchina che l'autore ha definito "Trasparoscopio" (da "trasparente" e "scopio", vedere)? Come mostra la nostra illustrazione, sarà di valore inestimabile per la medicina. Ci permetterà di vedere i nostri organi interni, con i loro veri colori e con la loro forma reale. Per esempio, sarà possibile guardare il cuore che batte e il medico, invece di auscultare il battito cardiaco, potrà semplicemente vedere che cosa non va. Potrà esaminare i polmoni, e non dovrà più battere sul petto per individuare la malattia. Prima di eseguire un'operazione, i medici potranno vedere con i propri occhi esattamente che cosa non va in un organo e non dovranno fare affidamento su interventi a caso; non ci sarà più bisogno di aprire il paziente per scoprire quale sia il problema reale.[5]

Gernsback è stato curiosamente preveggente: nell'arco di pochi decenni sarebbe stata realizzata una nuova tecnologia che avrebbe consentito di produrre immagini tridimensionali dell'interno del corpo umano, di organi come i polmoni e il fegato, e medici e chirurghi avrebbero utilizzato quelle immagini per orientare cure e interventi, come aveva predetto Gernsback. Questi immaginò che sarebbe stata necessaria qualche nuova forma misteriosa di raggio, per rendere possibile quelle immagini, ma in effetti i primi ricercatori che si cimentarono in questo campo utilizzarono in modi in precedenza non immaginati gli ormai umili raggi X. L'elemento mancante si sarebbe dimostrato essere il computer, che avrebbe consentito di combinare i dati di più fotografie a raggi X in immagini tridimensionali di risoluzione notevole; la nuova tecnica sarebbe stata chiamata tomografia assiale computerizzata (TAC), oggi semplicemente tomografia computerizzata.

Gernsback aveva visto giusto anche nel collegare le nuove tecniche di generazione di immagini mediche all'invisibilità. Con lo sviluppo della TAC e di altre tecnologie di *imaging*, la questione degli oggetti invisibili sarebbe ricomparsa in un modo nuovo, inatteso.

La storia della tomografia computerizzata inizia con un atto di dimissioni. Il fisico sudafricano Allan MacLeod Cormack (1924-1998) era assistente all'Università di Città del Capo nel 1955, quando il fisico ospedaliero del vicino Groote Schuur Hospital diede le dimissioni. L'ospedale utilizzava isotopi radioattivi per il trattamento dei tumori (una tecnica chiamata radioterapia) e la legge del Sudafrica richiedeva che un fisico qualificato sovrintendesse all'uso di quei materiali. Cormack accettò di lavorare all'ospedale per un giorno e mezzo alla settimana per parte del 1956.

Nella tecnica della radioterapia, si indirizzano raggi X verso un tumore, al fine di danneggiarlo o distruggerlo; gli stessi effetti dannosi che avevano causato la morte di Dally, l'assistente di Edison, vengono utilizzati per colpire le cellule tumorali. Per calcolare la dose appropriata di raggi X da inviare al tumore, però, idealmente bisognerebbe sapere quali tessuti attraversino lungo il percorso, perché i raggi X vengono assorbiti in misura diversa da tessuti diversi: le ossa, per esempio, ne assorbono più di altri tessuti, ed è il motivo per cui le comuni immagini a raggi X mostrano un'ombra dello scheletro. Ai tempi di Cormack, la determinazione della dose opportuna era un procedimento per tentativi, basato su stime grossolane di quello che i raggi incontravano mentre si dirigevano verso il loro bersaglio. Quei limiti portarono Cormack a pensare a un nuovo approccio: "Mi è venuto in mente che, per migliorare la pianificazione del trattamento, sarebbe stato necessario conoscere la distribuzione del coefficiente di attenuazione dei tessuti nell'organismo, e che quella distribuzione si doveva stabilire con misurazioni effettuate esternamente al corpo"[6]. Cormack iniziò a studiare il problema matematico: supponiamo di prendere molte immagini a raggi X del corpo umano, da molte direzioni, e di combinare fra loro quelle informazioni; si potrebbe dedurne la struttura tridimensionale completa del corpo? Fece

rapidamente progressi e nel 1957 condusse un esperimento per misurare la struttura interna di un cilindro di alluminio circondato da un anello di legno. Inaspettatamente, le misurazioni mostrarono che il centro del cilindro di alluminio aveva un coefficiente di assorbimento dei raggi X inferiore al resto della struttura. I responsabili della fabbrica che aveva prodotto il cilindro confermarono che la parte centrale era stata realizzata con un materiale leggermente diverso; la tecnica di Cormack poteva effettivamente scoprire strutture ignote all'interno degli oggetti esaminati.

Nei sei anni successivi, Cormack tornò a più riprese a occuparsi del problema, essendosi trasferito nel 1957 alla Tufts University nel Massachusetts. Nel 1963 iniziò a lavorare sulla misurazione della struttura di oggetti metallici non simmetrici come un cilindro, e incaricò uno studente di scrivere un programma per computer per analizzare i dati complessi. I risultati mostrarono chiaramente che era possibile utilizzare più misurazioni a raggi X per determinare la struttura interna di oggetti complessi. Nonostante questo, Cormack ricordava che la reazione iniziale a quella scoperta era stata scoraggiante: "La pubblicazione avvenne nel 1963 e nel 1964. Non ci fu praticamente risposta. La richiesta più interessante di un reprint venne dal Centro svizzero per le ricerche sulle valanghe. Il metodo avrebbe potuto funzionare per depositi di neve sulle montagne, se fosse stato possibile portare o il rilevatore o la sorgente in montagna sotto la neve!"[7].

Come accade spesso nella scienza, però, anche altri inevitabilmente seguirono la stessa linea di pensiero e uno di quei ricercatori era particolarmente adatto alla complessità del compito. Godfrey Hounsfield (1919-2004), un ingegnere elettromeccanico inglese, aveva studiato le basi dell'elettronica e del radar mentre lavorava come riservista volontario per la Royal Air Force. Nel 1949 entrò alla EMI

(Electric and Musical Industries), Ltd., nel Middlesex in Inghilterra, dove continuò le sue ricerche sui sistemi di guida delle armi e sul radar[8]. Era l'epoca di progressi straordinari nel campo dei computer e, nel 1947, l'invenzione del transistor portò allo sviluppo dei primi computer a transistor, in sostituzione di quelli basati sulle valvole termoioniche. Hounsfield, all'interno di EMI, fu a capo del progetto di sviluppo del primo computer commerciale realizzato in Gran Bretagna, l'EMIDEC 1100.

Verso la fine degli anni Sessanta, Hounsfield si era dedicato al problema di utilizzare i computer per il riconoscimento di forme, per esempio per l'identificazione della scrittura a mano, delle impronte digitali e dei volti. Si scontrava sempre con lo stesso tipo di domanda: qual è la relazione fra un insieme complicato di dati raccolti e le informazioni fondamentali che vogliamo estrarre da quei dati? Riflettendo su questi problemi, iniziò a pensare alle immagini a raggi X e giunse alla stessa conclusione che aveva raggiunto Cormack anni prima: le informazioni combinate di più radiografie, ottenute da più angolazioni, potevano fornire informazioni dettagliate sull'interno di una struttura. Impostò alcune simulazioni al computer di una "scatola nera" contenente oggetti nascosti e simulò le immagini che si sarebbero potute produrre illuminando la scatola con raggi X da direzioni diverse. Con quelle informazioni, fu in grado di ricostruire un'immagine degli oggetti (simulati) nascosti. Il risultato era incoraggiante, e Hounsfield iniziò a preparare un prototipo di laboratorio.

Vale la pena di perdere un momento per avere almeno un'idea semplificata di come funzioni questa tecnica. Immaginiamo, come nella simulazione di Hounsfield, di avere una scatola sigillata al cui interno si trovi un oggetto sconosciuto e immaginiamo ancora che l'oggetto assorba tutti i raggi X che lo raggiungono. Inviamo dei raggi

X da sinistra e registriamo l’intensità dei raggi sulla destra (Figura 11.2). Questa singola immagine, che è una radiografia tradizionale, è chiamata anche ombrogramma, poiché possiamo scoprire qualcosa sull’oggetto a partire dall’ombra che getta. Come mostra l’illustrazione, però, più oggetti possono produrre la stessa ombra – un quadrato, un rettangolo, un cerchio o un triangolo. Poi inviamo i raggi X dal basso: l’ombra ridotta elimina il rettangolo ma lascia aperta la possibilità delle altre forme. Poi inviamo i raggi X da un’angolatura e scopriamo che l’oggetto in quel caso getta un’ombra maggiore, il che elimina la possibilità che si tratti di un cerchio. Non sappiamo ancora la forma esatta dell’oggetto, ma, ottenendo ombrogrammi da un numero sempre maggiore di direzioni, otteniamo sempre più informazioni. Questa è l’essenza della tomografia computerizzata: si possono utilizzare le informazioni ricavate da un gran numero di ombrogrammi per stabilire con precisione la forma dell’oggetto.
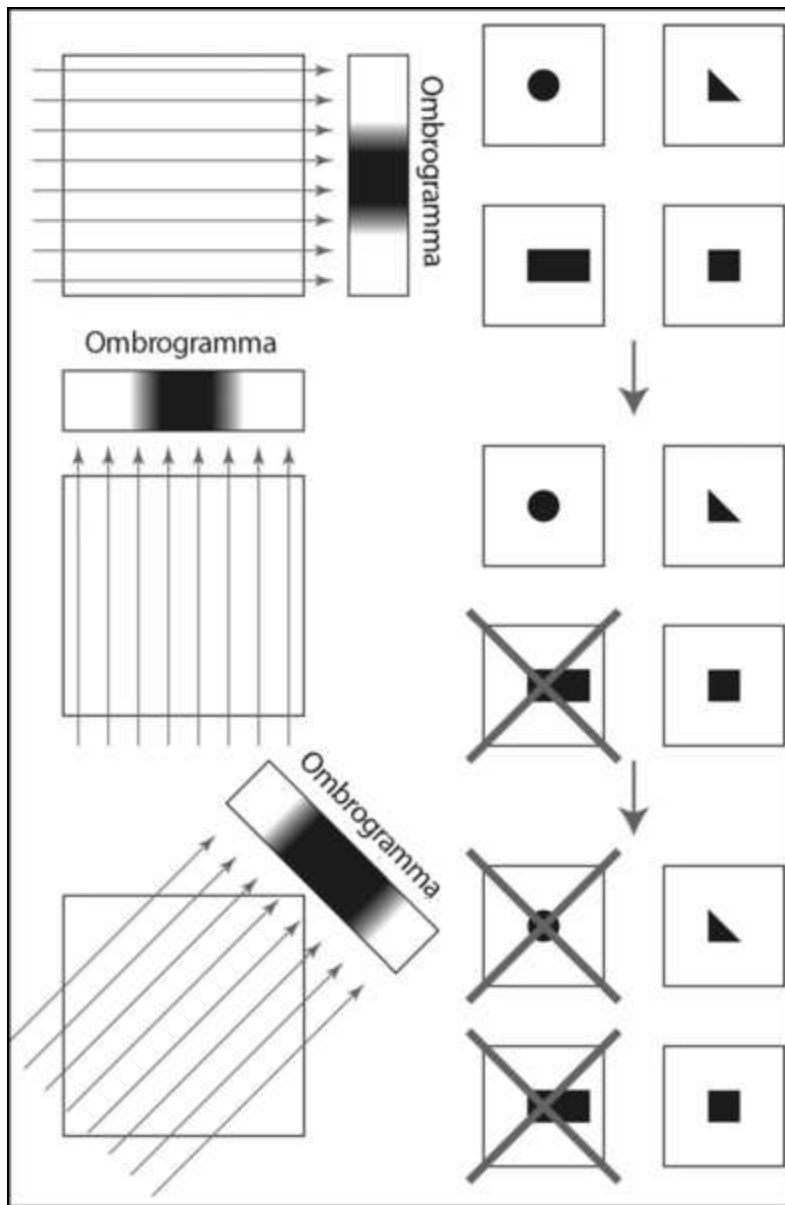
Figura 11.2 L’esecuzione di molte misurazioni dell’assorbimento dei raggi X consente di ottenere sempre più informazioni sull’oggetto e, con un processo di esclusione, sulla sua forma.

Per il suo primo prototipo di scanner, Hounsfield utilizzò una sorgente di raggi gamma, onde elettromagnetiche di energia significativamente maggiore rispetto ai raggi X; probabilmente perché ne aveva una a disposizione nel suo laboratorio. Fu in grado di produrre un’immagine dell’oggetto, ma la sorgente di raggi gamma era

di intensità tanto bassa che gli ci vollero nove giorni per raccogliere le 28.000 misurazioni necessarie per ricostruire l'immagine. Poiché i risultati erano positivi e incoraggianti, sostituì la sorgente di raggi gamma con un tubo a raggi X e riuscì a ridurre a nove ore il tempo necessario per le misurazioni.

I primi test furono condotti su "fantasmi" di plastica che rappresentavano rozzamente parti del corpo umano; quando i test ebbero successo, passò a esaminare un cervello umano conservato da un ospedale locale. Le immagini del cervello furono eccellenti, ma si rese conto subito che erano troppo buone: le sostanze chimiche utilizzate per la conservazione contribuivano anche a migliorare l'immagine, rispetto a quella che si sarebbe potuta ottenere con un paziente in vita. Per avere un'alternativa più realistica, Hounsfield acquistò cervelli bovini freschi e li portò con la metropolitana fino al suo laboratorio: le immagini che ottenne non erano chiare come quelle dei cervelli conservati, ma poté confermare che erano ancora visibili dettagli anatomici importanti. Le misurazioni però erano ancora così lente che il campione iniziava a subire una putrefazione significativa nel corso del processo, e le immagini perciò si degradavano.

Tutto questo ha portato alla costruzione della prima macchina per usi clinici, testata nel 1972 (Figura 11.3). La prima paziente fu una donna, che si sospettava avesse una lesione cerebrale, e l'immagine calcolata mostrò chiaramente la cisti nel cervello. Era chiaro che la nuova tecnica aveva un valore diagnostico reale.

Figura 11.3 La prima macchina per la tomografia computerizzata a raggi X per usi clinici. Illustrazione tratta da G.N. Hounsfield, “Computerized Transverse Axial Scanning (Tomography): Part I. Description of System”, “British Journal of Radiology”, 46 (1973), p. 1016-223. Riprodotto per gentile concessione di British Institute of Radiology, attraverso Copyright Clearance Center, Inc.

Hounsfield pubblicò il primo articolo sulla nuova tecnica nel 1973, che chiamò “Computerized Transverse Axial Scanning (Tomography)”[9]. Il termine “tomografia” viene dalle parole greche *tomos* (fetta, sezione) e *grafia* (scrittura) e descrive come la macchina produce un’immagine tridimensionale del corpo umano con una serie di immagini bidimensionali che possono essere sovrapposte come gli strati di una torta. Non fu Hounsfield, però, a coniare il termine: era stato già utilizzato per descrivere un’altra tecnica a raggi X per produrre immagini di una parte di un corpo umano, in cui la sorgente di raggi X e il rilevatore vengono mossi lungo un percorso circolare

sui due lati del paziente. Il movimento fa sì che nell'ombrogramma prodotto risultino sfumate tutte le parti del paziente tranne la "sezione" che si trova direttamente fra sorgente e rilevatore. A differenza di questa tecnica precedente, però, la nuova tomografia di Hounsfield era sostanzialmente esatta; non ha bisogno di sfumature e può dare una descrizione quantitativa di come i raggi X vengono assorbiti da parti diverse del corpo umano.

La tomografia computerizzata è diventata quasi immediatamente uno strumento standard in campo medico; Cormack e Hounsfield hanno condiviso il premio Nobel del 1979 per la Fisiologia o la Medicina "per lo sviluppo della tomografia assistita dal computer".

Quasi nello stesso periodo in cui Hounsfield sviluppava la tomografia computerizzata, altri ricercatori inventavano un altro strumento importante per la produzione di immagini mediche: la *Magnetic Resonance Imaging* (MRI, imaging a risonanza magnetica). In questa tecnica, i nuclei degli atomi in un paziente vengono eccitati da campi magnetici, facendoli vibrare in modo che producano segnali radio. Questi segnali poi vengono misurati e, come nella tomografia, i dati vengono combinati con strumenti informatici per produrre un'immagine della struttura interna del paziente. Le prime scansioni MRI di un essere umano furono condotte nel 1977 e il primo scanner clinico fu installato nel 1980. Nell'arco di un decennio sono state sviluppate due nuove tecniche di imaging, TAC e MRI, che hanno rivoluzionato la medicina.

La scoperta e l'immediata accoglienza di questi nuovi metodi di imaging hanno dato un fortissimo impulso a un campo di studi matematici, attivo da decenni, quello relativo ai problemi inversi. Nella maggior parte dei tradizionali problemi di fisica, si deduce un "effetto" da una "causa". Per esempio, quando chi studia la fisica elementare calcola la traiettoria di una palla lanciata in aria, determina

l’effetto (la traiettoria della palla) a partire dalla causa (la forza di gravità e il modo in cui la palla è stata lanciata). Per fare un esempio più pertinente: quando calcoliamo la radiazione elettromagnetica prodotta da una serie di cariche e correnti elettriche oscillanti, determiniamo l’effetto (la radiazione misurata in tutte le direzioni, cioè il diagramma di radiazione) a partire dalla causa (cariche e correnti oscillanti).

Nel caso del problema inverso si cerca di fare il contrario, cioè di dedurre una “causa” da un “effetto”. Nel caso di una palla lanciata, l’obiettivo sarebbe utilizzare la traiettoria della palla (l’effetto) per stabilire esattamente come sia stata lanciata (la causa). Nell’esempio della radiazione, il problema inverso sarebbe utilizzare il diagramma di radiazione (l’effetto) per determinare la struttura delle cariche e correnti oscillanti (la causa). Questo particolare problema inverso è noto come problema inverso della sorgente, perché si vuole determinare la struttura della sorgente della radiazione. Anche il comune processo della vista può essere considerato un problema inverso: il nostro cervello interpreta la luce raccolta dagli occhi come un’immagine del mondo che ci circonda.

Un esempio di problema inverso, risalente a prima ancora che venisse chiamato così, è stato la scoperta del pianeta Nettuno, nel 1846, da parte di John Couch Adams e Urbain Le Verrier. Si era notato che l’orbita del pianeta Urano mostrava delle deviazioni da quella teorica, e Adams e Le Verrier hanno immaginato, indipendentemente, che le deviazioni fossero dovute all’azione di un pianeta ancora sconosciuto. Effettuarono i calcoli matematici per prevedere la posizione, la massa e il moto del nuovo pianeta (la causa) a partire dalla sua influenza su Urano (l’effetto) e il pianeta in seguito fu effettivamente osservato nell’area indicata dai calcoli.

Poiché si inverte la normale direzione (dalla causa all'effetto) della risoluzione di problemi, i problemi inversi possono andare incontro a varie difficoltà matematiche. Possiamo cercare di comprenderle considerando un esempio di problema inverso al di fuori della fisica: la ricerca del colpevole in base alle prove ritrovate sulla scena del crimine, come in molti classici racconti di Sherlock Holmes. Una delle difficoltà principali è quella che i matematici chiamano non continuità: piccole imprecisioni nei dati (rumore) possono portare a una soluzione del tutto errata. Sulla scena del crimine, per esempio, una persona innocente può avere bevuto qualcosa con la vittima ore prima che venisse uccisa, così ha lasciato le sue impronte sulla scena e l'investigatore può essere indotto a credere erroneamente che sia il colpevole. Poiché i dati raccolti contengono sempre rumore casuale, un problema inverso non continuo produrrà risultati senza senso, a meno che non si utilizzino tecniche matematiche per tenere conto della non continuità.

L'altra difficoltà importante è la non unicità: semplicemente, è possibile che i dati presenti non siano sufficienti per individuare un'unica soluzione. Nel caso della scena del crimine, è possibile che si sia trattato di un "crimine perfetto" e che il colpevole non abbia lasciato alcuna traccia che porti alla sua identificazione, oppure che vi siano così tanti indizi da portare a tanti sospettati, ma senza che sia possibile puntare il dito sull'uno o sull'altro. In entrambi i casi, le informazioni ottenute sulla scena del crimine non sono sufficienti per risolvere il caso. Per dirlo in un altro modo, il colpevole è a tutti gli effetti *invisibile* per i nostri investigatori.

Un modo per ovviare ai problemi della non continuità e della non unicità è l'uso di conoscenze precedenti: informazioni sulla soluzione del problema che sono indipendenti dai dati. Per esempio, per tornare all'analogia della scena del crimine, gli investigatori non baseranno le

loro indagini solo sulle prove raccolte sulla scena, ma utilizzeranno anche interrogatori dei sospettati, documentazione finanziaria e altre informazioni ancora per ridurre l'elenco dei possibili colpevoli. Nei problemi di imaging, la conoscenza preesistente può essere anche solo quella delle dimensioni approssimative dell'oggetto di cui ottenere l'immagine: un'immagine ricostruita che sia molto più grande o molto più piccola del previsto può essere scartata.

L'avvio dello studio dei problemi inversi come campo matematico autonomo può essere fatto risalire a un articolo del matematico tedesco Hermann Weyl, pubblicato nel 1911[10]. Weyl, in sostanza, stava cercando di rispondere alla domanda: "Si può sentire la forma di un tamburo?". Thomas Young e altri avevano notato che i toni risonanti di una canna d'organo (le frequenze a cui emette un suono) dipendono dalla lunghezza e dal diametro della canna. Analogamente, le frequenze a cui vibra la pelle di un tamburo dipendono dalle dimensioni e dalla forma della pelle. Weyl ne ricavò un problema inverso: se sappiamo a quali frequenze vibra la pelle del tamburo, possiamo determinare la forma del tamburo? (Molto tempo dopo, a questa domanda sarebbe stata data una risposta negativa: il problema inverso non può avere una soluzione unica.)

Una volta scoperta e sviluppata la fisica quantistica, sono sorte domande simili a proposito degli atomi, che emettono luce a frequenze caratteristiche: se conosciamo le frequenze della luce emessa da un atomo, che cosa possiamo dire della struttura dell'atomo stesso? Un articolo fondamentale su questo argomento fu pubblicato nel 1929 dall'astronomo armeno-russo Viktor Ambartsumian sulla rivista tedesca *Zeitschrift für Physik*, ma per molto tempo non ha ricevuto alcuna attenzione. Come ha commentato in seguito Ambartsumian, "Se un astronomo pubblica un articolo di contenuto matematico su una rivista di fisica, la cosa più probabile è che sia condannato all'oblio"[11].

Dopo la Seconda guerra mondiale, però, il suo lavoro è stato riscoperto ed è diventato un tassello fondamentale per la teoria dei problemi inversi.

Ancora prima dello sviluppo della tomografia computerizzata e della MRI, molti ricercatori avevano studiato il problema inverso della sorgente: determinare la struttura di una sorgente dalla misurazione delle onde che emette. La soluzione del problema era considerata importante per molti tipi di onde e di applicazioni: un elenco è stato stilato in un report di Normal Beistein e Norbert Bojarski, che riportiamo in parte.

- Costruzione di immagini di tumori.
- Analisi di strati sottosuperficiali per identificazione e recupero di risorse.
- Localizzazione e identificazione di scariche nelle tempeste per l'analisi delle tempeste stesse e la previsione di tornado in base ai pattern caratteristici della sorgente.
- Localizzazione di corpi sepolti, un problema importante per la polizia.
- Costruzione di immagini di aerei, missili, navi e sottomarini.
- Individuazione di mine.[12]

In tutte queste applicazioni, una sorgente produce radiazione che poi attraversa gli oggetti bersaglio, o ne viene riflessa; gli oggetti distorcono le onde irraggiate. L'idea è che, misurando le distorsioni delle onde, si possa determinare quale oggetto le abbia distorte, che sia un tumore o un corpo sepolto.

In quello stesso lavoro, Bleistein e Bojarski ipotizzavano anche che il problema inverso della sorgente potesse avere una soluzione unica. Nel 1959, però, il ricercatore Harry Moses della New York University aveva già concluso "che, in generale, le sorgenti non sono uniche"[13].Nel 1977, lo stesso Norman Bleistein, che aveva sostenuto

l'unicità della soluzione, sosteneva il contrario, insieme al collega Jack Cohen, in un articolo intitolato "Nonuniqueness in the Inverse Source Problem in Acoustics and Electromagnetics": chiaramente aveva cambiato la sua opinione scientifica con la disponibilità di nuove informazioni.[14] Bleistein e Cohen individuavano anche una connessione importante: sostenevano che la non unicità del problema inverso della sorgente era collegata direttamente all'esistenza di sorgenti non radianti, di cui abbiamo parlato ampiamente.

Con il senno di poi, era una connessione ovvia. Il problema inverso della sorgente è un tentativo di determinare la struttura di una sorgente da misurazioni della radiazione che produce. Se una sorgente non produce radiazione, non può essere rilevata e la sua struttura non può essere determinata: è invisibile, per quanto riguarda il problema inverso della sorgente. Chiaramente, un oggetto invisibile non può essere rilevato, ma Bleistein e Cohen proponevano un ragionamento ancora più stringente: se le sorgenti non radianti esistono *anche solo in linea di principio*, allora il problema inverso della sorgente non ammette una soluzione unica. Non è necessario che sia presente una sorgente non radiante per rendere il problema insolubile; la semplice possibilità di sorgenti non radianti dimostra che la soluzione non può essere unica.

Questa affermazione non convinse molti ricercatori che avevano dedicato tempo ed energia alla soluzione del problema inverso. Nel 1981, Norbert Bojarski pubblicò quella che pensava fosse una soluzione unica, liquidando ogni preoccupazione relativa alle sorgenti non radianti[15]. In quello stesso anno, W. Ross Stone sostenne che le sorgenti non radianti semplicemente non esistono[16]. Stone sostenne, erroneamente, che le uniche sorgenti non radianti possibili sono di dimensioni infinite e, poiché nessuna sorgente è di dimensioni infinite, le sorgenti non radianti non possono esistere, pertanto il problema

inverso della sorgente ammette una soluzione univoca. Stone forse non conosceva l'articolo del 1911 in cui Ehrenfest anticipava la sua argomentazione e mostrava, con la sua sfera pulsante, che esiste almeno una sorgente non radiante di dimensioni finite.

In risposta a Bojarski e Stone, Anthony Devaney e George Sherman di Schlumberger-Doll Research scrissero un articolo ("Non-uniqueness in Inverse Source and Scattering Problems"), in cui evidenziavano senza alcuna incertezza che le sorgenti non radianti sono possibili e che la loro esistenza rende definitivamente non unica la soluzione del problema inverso[17]. Ne seguì un botta e risposta particolarmente acceso, a stampa, fra Stone e Bojarski a sostegno dell'unicità da una parte, e Devaney e Sherman a sostegno della non unicità. Si può percepire la frustrazione nella risposta di Devaney e Sherman a Stone: "In primo luogo, vogliamo attirare l'attenzione del lettore sull'affermazione di Stone, secondo la quale ha 'presentato una dimostrazione per assurdo che i campi prodotti da sorgenti non radianti non sono coerenti con un termine sorgente diverso da zero nell'equazione disomogenea dell'onda'. Stone continua dicendo che 'volontariamente' non ha pubblicato questa dimostrazione. Conoscendo bene questa cosiddetta 'dimostrazione' possiamo vedere perché sia riluttante a pubblicarla: è sbagliata". Devaney e Sherman concludevano con un commento devastante: "Se, dopo il materiale presentato in [Riferimento 12] e il controesempio qui sopra, Stone insiste ancora che i problemi inversi della sorgente ammettono soluzioni univoche, discuterne ulteriormente sarebbe inutile".[18]

Va notato che discussioni scientifiche accese come queste non sono rare, e che spesso fanno parte del processo scientifico. Ciascun ricercatore presenta le proprie argomentazioni più forti a favore della propria posizione, e sta agli scienziati che le leggono valutarne la validità. Devaney e Sherman erano particolarmente frustrati, in questo

caso, perché avevano presentato prove prive di ogni ambiguità per l'esistenza di sorgenti non radianti.

Anche se la discussione sulla non unicità rimase irrisolta nella corrispondenza a stampa, convinse la maggior parte dei ricercatori che il problema inverso della sorgente non potesse essere risolto. Questo però fece sorgere subito domande sulle nuove tecniche di produzione di immagini tridimensionali computerizzate: come possiamo essere sicuri che l'immagine calcolata sia tutto quello che c'è realmente? Per le immagini mediche, potrebbe essere realmente una questione di vita o di morte: se un tumore è "invisibile" non può essere individuato e trattato. Quando i ricercatori hanno iniziato a presentare nuovi tipi di tecniche di imaging al di là della tomografia computerizzata e della MRI, l'interrogativo sull'unicità e l'invisibilità sarebbe stato un problema a cui dare una risposta era fondamentale.

---

1 Bostwick "'Seeing' with X-Rays".

2 "Edison Says There Is Hope".

3 "Edison Fears Hidden Perils of the X-Rays".

4 Smith, *Skin and Bones.* Thorne Smith è famoso soprattutto per il romanzo del 1926 intitolato *Topper*, che racconta di come un banchiere e sua moglie diventino amici di una coppia di fantasmi. Il romanzo è stato la base per un film del 1937.

5 Gernsback, "Can We Make Ourselves Invisible?".

6 Cormack, "Nobel Lecture".

7 *Ibidem*.

8 Se il nome EMI vi suona familiare, è la stessa azienda che ha prodotto alcuni degli album musicali più significativi degli anni Sessanta e Settanta, fra gli altri dei Beatles e dei Pink Floyd.

9 Hounsfield, "Computerized Transverse Axial Scanning (Tomography)".

10 Weyl, "Über die asymptotische Verteilung der Eigenwerte".

11 Wikipedia, s.v. "Problemi inversi".

12 Bleistein e Bojarski, "Recently Developed Formulations of the Inverse Problem", pp. 1-2.

13 Moses, "Solution of Maxwell's Equations", 1670.

14 Bleistein e Cohen, “Nonuniqueness in the Inverse Source Problem”.

15 Bojarski, “Inverse Scattering Inverse Source Theory”.

16 Stone, “Nonradiating Sources of Compact Support Do Not Exist”.

17 Devaney e Sherman, “Nonuniqueness in Inverse Source and Scattering Problems”.

18 Ivi, pp. 1041-1042.

Capitolo 12

Un lupo in caccia

La creatura venne più vicino, sempre più vicino. Ora oscillava indietro e avanti nei suoi battiti silenziosi sulla nostra riva del ruscello. Chiaramente, stava dando la caccia a Carl, e si assicurava che la sua vittima non fosse tornata indietro. Andava avanti e indietro, indietro e avanti; e non ho mai passato momenti di apprensione più orribili o nauseanti di quelli trascorsi nell'attesa dell'arrivo della bestia, qualsiasi cosa potesse essere, incapace tanto di difendermi quanto di fuggire.

Venne più vicino, sempre più vicino, e ora potevo distinguere più chiaramente la sua forma. Mi sembrava che le sue dimensioni fossero di gran lunga superiori a quelle comuni – ma poteva essere anche un'illusione creata dalla luce incerta della luna o dai miei sensi sovreccitati – ma era solo un lupo, un lupo solitario!

"Fatti coraggio!", sussurrai a Carl. "Non è altro che un solo lupo. Noi siamo due. Non oserà attaccarci."

"Non oserà!", rispose. "Lo sai che cos'è quel lupo? È proprio lui! È Fritz!"

– F. Scarlett Potter, *The Were-Wolf of the Grendelwold* (1882)[1]

Nel 1975, sul *Journal of the Optical Society of America* fu pubblicato il primo articolo scientifico su un oggetto veramente invisibile. Scritto da Milton Kerker e intitolato semplicemente "Invisible Bodies", presentava un oggetto che non diffondeva le onde elettromagnetiche che lo raggiungevano: le onde gli sarebbero passate attraverso e avrebbero continuato il loro viaggio come se non avessero incontrato alcunché[2].

Non sembra che questa scoperta abbia attirato molta attenzione da parte dei media, anche se lo si può capire: gli oggetti che Kerker aveva descritto sul piano teorico erano particelle minuscole, ciascuna molto più piccola della lunghezza d'onda della luce e più simili a granelli di polvere, a microscopiche gocce d'acqua o a minuscoli granelli di

sabbia. Milton Kerker era un esperto indiscusso sullo scattering della luce da parte di piccole particelle, perciò quella forma di invisibilità era un’estensione naturale della sua specializzazione.

I corpi invisibili di Kerker dipendono dalla fisica di base dello scattering della luce. Quando la luce illumina un oggetto, le onde elettromagnetiche mettono in vibrazione gli elettroni nell’oggetto, trasferendo loro parte della propria energia. Quegli elettroni, che ora sono sottoposti ad accelerazione, producono le proprie onde elettromagnetiche, che sono la luce diffusa. Kerker immaginò di realizzare una piccola particella sferica formata da un nucleo interno e un guscio esterno, fluttuante in un liquido come l’acqua. Poi considerò il caso in cui l’indice di rifrazione del nucleo è minore di quello del liquido e l’indice di rifrazione del guscio è maggiore di quello del liquido. In una situazione del genere, si può dimostrare che, quando gli elettroni del nucleo accelerano verso l’alto, quelli del guscio accelerano verso il basso, e viceversa. Questo significa che le onde elettromagnetiche prodotte dal nucleo e dal guscio sono fra loro in opposizione di fase e si cancellano a vicenda per interferenza distruttiva. In assenza di scattering, l’onda in arrivo passa attraverso la particella, e questa non può essere rilevata: è invisibile (Figura 12.1).
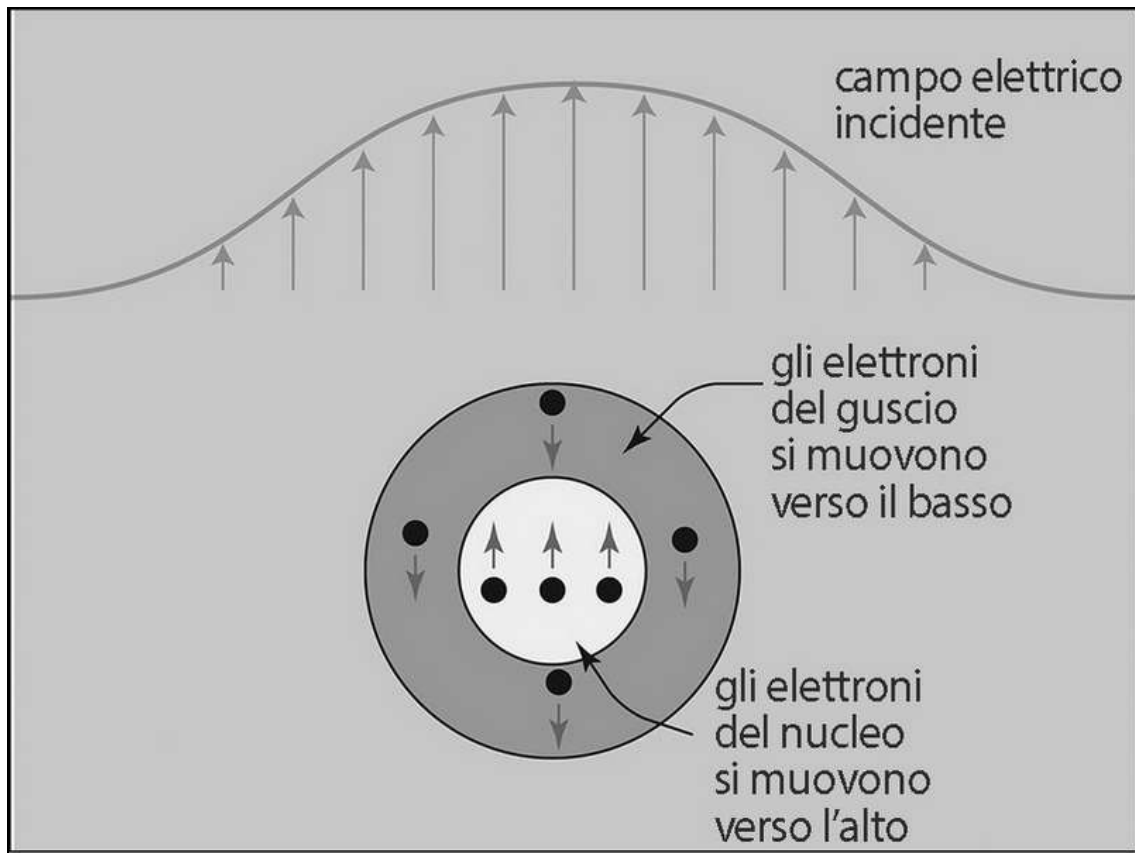
Figura 12.1 I corpi invisibili di Kerker e il loro comportamento.

Va notato che una singola particella di piccole dimensioni di qualsiasi tipo sarebbe già a tutti gli effetti invisibile; diffonderebbe una quantità tanto piccola di luce da non poter essere vista dall'occhio. Quando però vi sono molte particelle aggregate, come nella nebbia umida o in una nuvola di polvere, la diffusione combinata di tutte le particelle impedisce alla luce di passare. Lo stesso effetto fa sì che il latte sia opaco: le molecole dei grassi del latte, immerse nell'acqua, diffondono la luce. I corpi invisibili di Kerker, però, anche se raggruppati in grande quantità, rimarrebbero invisibili perché ogni singola particella è di per sé perfettamente invisibile. La ricerca di Kerker era stata finanziata da un ente molto particolare, come era esplicitamente dichiarato nell'articolo: "Questa ricerca è stata in parte supportata dal Paint Research Institute nell'ambito di uno studio

numerico dell’effetto di microvuoti sul potere occultante delle vernici”. In sostanza, Kerker si è imbattuto nell’invisibilità mentre studiava le proprietà delle vernici.

Più o meno all’epoca in cui Kerker annunciava i suoi corpi invisibili, un altro ricercatore iniziava a esplorare le possibilità dell’invisibilità, sotto la forma delle sorgenti non radianti: il professor Emil Wolf alla fine avrebbe compiuto uno dei primi tentativi di dimostrare l’esistenza (o la non esistenza) di oggetti invisibili in generale. Anche se una particella minuscola può essere invisibile, si potrebbe dire lo stesso di oggetti di maggiori dimensioni?

Emil Wolf era nato nel 1922 a Praga, in Cecoslovacchia, all’inizio di un periodo turbolento per l’Europa. Ebreo, fuggì dal suo paese verso la fine degli anni Trenta, quando i tedeschi lo occuparono: si trasferì in Italia e poi in Francia, dove trovò lavoro presso il governo ceco in esilio a Parigi, che inizialmente lo impiegò come corriere in bicicletta. Wolf era in difficoltà nel traffico frenetico della capitale francese; per fortuna, il governo in esilio lo stimava abbastanza da trovargli un altro lavoro[3].

Quando i tedeschi invasero la Francia, Wolf fuggì in nave verso l’Inghilterra e, per incredibile coincidenza, su quella nave trovò il fratello, che aveva fatto parte dell’esercito ceco in lotta con l’invasore. Wolf si meravigliò molto di quel colpo di fortuna: forse non avrebbe mai più trovato il fratello, dopo la guerra, se non fosse stato per quell’incontro casuale; rimasero in contatto per il resto della vita[4].

In Inghilterra, Wolf frequentò l’Università di Bristol e ottenne una laurea nel 1945. Poi proseguì gli studi con Edward Linfoot, un matematico specializzato nel campo dell’ottica, e ottenne il dottorato in matematica nel 1948. In quel periodo, Linfood fu nominato vicedirettore dell’Osservatorio dell’Università di Cambridge, e offrì a

Wolf un posto come assistente. Wolf lo accettò e trascorse i due anni successivi a Cambridge.

In quell'arco di tempo, gli capitava spesso di recarsi a Londra per partecipare alle riunioni dell'Optical Group della British Physical Society, che si tenevano di solito all'Imperial College. Vi partecipava regolarmente anche Dennis Gabor, l'inventore della tecnica di registrazione di immagini tridimensionali che va sotto il nome di olografia. Nella fotografia comune, si registra su una pellicola fotografica solo l'intensità della luce e si ottiene un'immagine bidimensionale di una scena. Nell'olografia, si registra sulla pellicola la figura di interferenza di due onde: una è quella diffusa dall'oggetto da riprendere, la seconda è un'onda "di riferimento". La figura di interferenza registra la fase dell'onda dell'oggetto e anche la sua intensità, e l'immagine risultante appare quindi tridimensionale, mantenendo le informazioni di profondità e prospettiva. Gabor avrebbe vinto il premio Nobel per la Fisica nel 1971 "per l'invenzione e lo sviluppo del metodo olografico".

Wolf e Gabor strinsero presto amicizia, e dopo le riunioni della Physical Society spesso Gabor invitava Wolf nel suo ufficio per parlare delle rispettive ricerche. Attraverso Gabor, Wolf venne a sapere di una opportunità straordinaria: collaborare con uno dei grandi fisici del XX secolo, il tedesco Max Born, teorico dei quanti. Born era stato attivamente coinvolto nel primo sviluppo della meccanica quantistica ed è noto in particolare per avere dato risposta a una domanda importante sulle onde delle particelle quantistiche: che cosa "ondeggia"? Per un'onda elettromagnetica, si sapeva che i campi elettrico e magnetico sono le grandezze che si propagano sotto forma di onda, ma per una particella quantistica come un elettrone non era affatto chiaro, a tutta prima, come interpretare le sue proprietà ondulatorie. Born proposte un'interpretazione probabilistica della

funzione d’onda quantistica: l’onda descrive la *probabilità* di trovare una particella in un particolare punto dello spazio. Se si esegue l’esperimento delle due fenditure di Young con gli elettroni, i punti luminosi sullo schermo di osservazione corrispondono alle posizioni in cui è probabile che si trovi l’elettrone, mentre i punti scuri corrispondono a posizioni in cui è improbabile trovare l’elettrone. Born avrebbe vinto il premio Nobel per la Fisica nel 1954 per “la ricerca fondamentale sulla meccanica quantistica, in particolare per l’interpretazione statistica della funzione d’onda”. Vale la pena notare che la stessa interpretazione statistica può essere applicata alle caratteristiche ondulatorie di un fotone.

Nel 1950, Born aveva 67 anni e si avvicinava all’età della pensione. Nel 1933, aveva pubblicato in tedesco un libro che si intitolava semplicemente *Optik*, ed era interessato ad aggiornarlo includendovi gli sviluppi più recenti, e a pubblicarlo in lingua inglese[5]. Gabor gli consigliò Wolf come assistente, e Born lo assunse in gran parte fidandosi della sua raccomandazione. Wolf si trasferì a Edimburgo nel gennaio 1951 per aiutarlo nella stesura del libro. Aveva quarant’anni meno di Born; così, più avanti negli anni, molti gli chiedevano se fosse il figlio di quell’Emil Wolf che aveva lavorato al libro con Born. Raccontava che una persona che glielo aveva chiesto per lettera, dopo che Wolf gli aveva spiegato di essere l’autore originale, gli aveva scritto: “Congratulazioni! Lei deve avere almeno 100 anni!”[6].

Il libro fu poi pubblicato con il titolo *Principles of Optics*, e il suo completamento richiese circa otto anni, molto più di quello che pensavano entrambi gli autori. Wolf cominciò così a svolgere a sua volta ricerche sulle proprietà statistiche della luce, fondando un campo dell’ottica che oggi è noto come teoria della coerenza. Tutte le sorgenti di luce possiedono un certo grado di casualità, che si riflette in fluttuazioni casuali delle onde luminose emesse. La teoria della

coerenza nasce dalla domanda: in che modo la fluttuazione casuale della luce (le sue proprietà statistiche) influisce sulle proprietà osservate e misurate della luce? La teoria della coerenza è, in sostanza, una combinazione di fisica della luce e di statistica matematica.

Alla metà degli anni Cinquanta, Wolf fece una scoperta di grande importanza: le proprietà statistiche della luce si propagano come onda analogamente a come la luce stessa si propaga come onda. Le equazioni matematiche risultanti, oggi spesso chiamate equazioni di Wolf, costituiscono le basi della teoria della coerenza[7]. Inizialmente, l'idea incontrò un po' di resistenza; quando spiegò i suoi risultati a Born, questi gli mise un braccio intorno alle spalle e gli disse: "Wolf, lei è sempre stato una persona davvero sensata, ma adesso è diventato completamente pazzo!"[8]. A merito di Born va detto che rifletté ulteriormente sulla conclusione di Wolf e dopo qualche giorno si dichiarò d'accordo con lui.

Il lavoro sui *Principles of Optics* fu un po' rallentato, perché Wolf doveva finire di scrivere un capitolo sulla teoria della coerenza: sarebbe stato il primo libro a presentarne una descrizione. Quando Born scoprì che il collo di bottiglia era rappresentato da quel capitolo, scrisse a Wolf qualcosa come "Chi a parte lei è interessato alla coerenza parziale? Lasci perdere quel capitolo e spedisca il resto del manoscritto allo stampatore"[9]. Wolf ciononostante concluse il capitolo e lo incluse nel libro, che fu pubblicato nel 1959. Per fortunata coincidenza, nel 1960 fu presentato il primo laser funzionante. Queste nuove potenti sorgenti di luce hanno proprietà statistiche fuori dal comune, e una conoscenza della teoria della coerenza divenne necessaria per comprendere il comportamento dei laser. I *Principles of Optics* diventarono così uno strumento essenziale per quasi tutti i ricercatori nel campo dell'ottica, e il libro da allora è stato ristampato e riveduto molte volte; la settima edizione è stata pubblicata nel 1999.

Principles of Optics conteneva anche una delle prime descrizioni dell'olografia, cosa di cui Dennis Gabor fu molto grato; in seguito spedì a Wolf un reprint di un articolo sull'olografia con la dedica: "Ti considero il mio Capo Profeta!"[10].

Nel 1959 Wolf accettò un posto all'Università di Rochester, nello stato di New York, dove rimase per il resto della vita. Ebbe una carriera straordinariamente produttiva: pubblicò circa 500 articoli di ricerca e tre libri importanti sull'ottica e la coerenza. Nel corso della sua vita fu supervisore di una trentina di studenti laureati, molti dei quali sono poi diventati figure di primo piano nei rispettivi ambiti di ricerca.

Wolf lavorò su molti aspetti dell'ottica teorica, al di là della coerenza, e, come Max Born prima di lui, iniziò a studiare lo scattering della luce. In particolare, si interessò al problema inverso dello scattering: se si invia luce su un oggetto da molte direzioni e si misura la luce che in ciascun caso ne viene diffusa, si può determinare la struttura dell'oggetto? Nel 1969, Wolf combinò la teoria dello scattering di Born e le idee di Gabor sull'olografia e pubblicò un articolo sulla "determinazione della struttura tridimensionale di oggetti semitrasparenti a partire da dati olografici"[11]. Questo lavoro, anche se è precedente di vari anni, presenta somiglianze notevoli con quello di Hounsfield sulla tomografia computerizzata, e in seguito ha preso il nome di tomografia a diffrazione. La tomografia computerizzata, che utilizza i raggi X, ignora le proprietà ondulatorie della luce e determina la struttura esclusivamente tramite misurazioni dell'assorbimento dei raggi X; la tomografia a diffrazione, come si può intuire dal nome, utilizza le proprietà ondulatorie della luce e tiene conto della diffrazione della luce da parte di un oggetto.

Lo studio di problemi inversi, come quello che ha portato alla tomografia a diffrazione, portò Wolf in modo naturale a occuparsi di

questioni di invisibilità. A un certo punto, venne a conoscenza dei lavori precedenti sulle sorgenti non radianti[12]. Nel 1973, pubblicò il suo primo articolo sull'argomento: "Radiating and Nonradiating Classical Current Distributions and the Fields They Generate", con uno studente da poco laureato, Anthony Devaney[13]. Da quel momento, Wolf condusse ricerche sulle sorgenti non radianti per gran parte della sua carriera, chiarendone le proprietà curiose, e spesso apparentemente paradossali[14].

Ho conosciuto Emil Wolf attraverso le sorgenti non radianti. Intorno al terzo anno dei miei studi per il dottorato, stavo cercando di cambiare ambito di ricerca e, mentre eravamo a pranzo a un Taco Bell, un compagno di corso, Scott Carney, mi disse che Wolf stava cercando un altro assistente di ricerca laureato. Avevo circa 25 anni e Wolf ne aveva quasi 74: il divario di età fra noi era ancora maggiore di quello fra Born e Wolf quando avevano iniziato a lavorare insieme. Al primo incontro, è stata la prima cosa che Emil mi ha fatto notare: "Deve tenere in considerazione che sono vecchio e potrei morire in qualsiasi momento, ma i medici dicono che godo di buona salute e sto facendo ancora una gran quantità di lavoro". Poi mi ha messo in mano una bella pila dei suoi articoli pubblicati da leggere, e mi sono reso conto che erano stati tutti pubblicati nel corso degli ultimi cinque anni. Convinto che fosse una buona scelta, ho iniziato subito a lavorare con lui.

La ricerca che Wolf mi ha suggerito era un misto di teoria delle sorgenti non radianti e di teoria della coerenza. Una sorgente non radiante, come abbiamo visto, dipende dall'interferenza distruttiva completa delle onde che vengono emesse dalla sorgente; a quel tempo non era del tutto chiaro che una sorgente con fluttuazioni casuali ("parzialmente coerente") potesse ancora essere non radiante. Il mio primo articolo pubblicato su questo argomento nel 1997 dimostrava

che anche una sorgente con molta casualità può essere priva di radiazione[15]. Da lì, il mio dottorato si è sviluppato in uno studio generale dei fenomeni non radianti, che si è concluso con un articolo dal titolo "Nonradiating Sources and the Inverse Source Problem", pubblicato nel 2001[16].

Gli anni in cui ho lavorato con il professor Wolf sono stati fra i più gratificanti della mia vita. Wolf manteneva un gruppo di ricerca molto vivo e spesso ci ritrovavamo a pranzo per discutere idee scientifiche. Le discussioni potevano farsi anche molto animate, a volte con grandi urlate, ma Wolf voleva che, nonostante i disaccordi, rimanessimo sempre tutti amici. Considerava davvero i suoi studenti come componenti della famiglia e spesso li invitava a casa per partecipare alle cene e ai dessert preparati dalla moglie Marlies. Ho avuto il piacere di partecipare a molte di quelle cene, mentre aiutavo Wolf a completare la revisione dell'indice per la settima edizione di *Principles of Optics* (Figura 12.2).

Emil Wolf conservava molte caratteristiche "da vecchia scuola" dei professori della sua gioventù. Anche se eravamo tutti amici, voleva che i suoi studenti lo chiamassero "professor Wolf" o "dottor Wolf", almeno fino a che non raggiungevano nella loro carriera un livello tale da essere riconosciuti come degli uguali. Nel mio caso, è successo durante una visita a Rochester intorno al 2006, insieme a quella che era allora la mia fidanzata. Abbiamo avuto una piacevole cena in un ristorante italiano, e Beth stava chiacchierando con il "professor Wolf". A quel punto, Wolf le ha detto: "Per favore, professor Wolf è troppo formale – chiamami Emil". Poi si è rivolto a me, quasi come un ripensamento, e ha detto: "Direi che è il momento – anche tu puoi chiamarmi Emil!". Così, Beth ha potuto chiamarlo Emil dopo mezz'ora di conversazione, e prima di me. Una volta che potevi

chiamarlo per nome, non se ne dimenticava più, e ti correggeva infallibilmente se osavi chiamarlo di nuovo “professor Wolf”.

Figura 12.2 Emil Wolf e Greg Gbur festeggiano la conclusione delle revisioni per la settima edizione di “Principles of Optics” nel 1999.

In parte, l’interesse di Emil per le sorgenti non radianti derivava dallo stretto rapporto fra problema della sorgente e problema dello scattering. In un problema della sorgente (o problema della radiazione), un insieme di cariche elettriche oscillanti produce onde elettromagnetiche: la “radiazione”. In un problema dello scattering, un’onda di luce incide su un oggetto che la disperde. L’onda di luce fa sì che gli elettroni dell’oggetto entrino in vibrazione, il che produce onde elettromagnetiche: la “luce diffusa”. Nel problema della sorgente, assumiamo che le cariche elettriche siano state messe in moto ma non prendiamo in considerazione l’origine di quel moto; nel problema dello scattering, le cariche sono messe in moto dall’onda luminosa

incidente. Dal punto di vista matematico, il problema della sorgente è equivalente al problema dello scattering, quando si considera un oggetto raggiunto dalla luce proveniente da un'unica direzione (Figura 12.3).

L'esistenza di sorgenti non radianti perciò implica che esistano oggetti che diffondono la luce e che sono perfettamente invisibili quando sono raggiunti da luce proveniente da un'unica direzione. Questo a sua volta significa che non possiamo risolvere il problema inverso dello scattering, e determinare la struttura dell'oggetto, misurando il campo diffuso quando viene utilizzata una sola direzione di illuminazione. Questo è in accordo con quello che succede nella tomografia computerizzata: un singolo ombrogramma a raggi X non ci dà abbastanza informazioni per determinare la struttura tridimensionale di un paziente, perciò si devono utilizzare molti ombrogrammi.
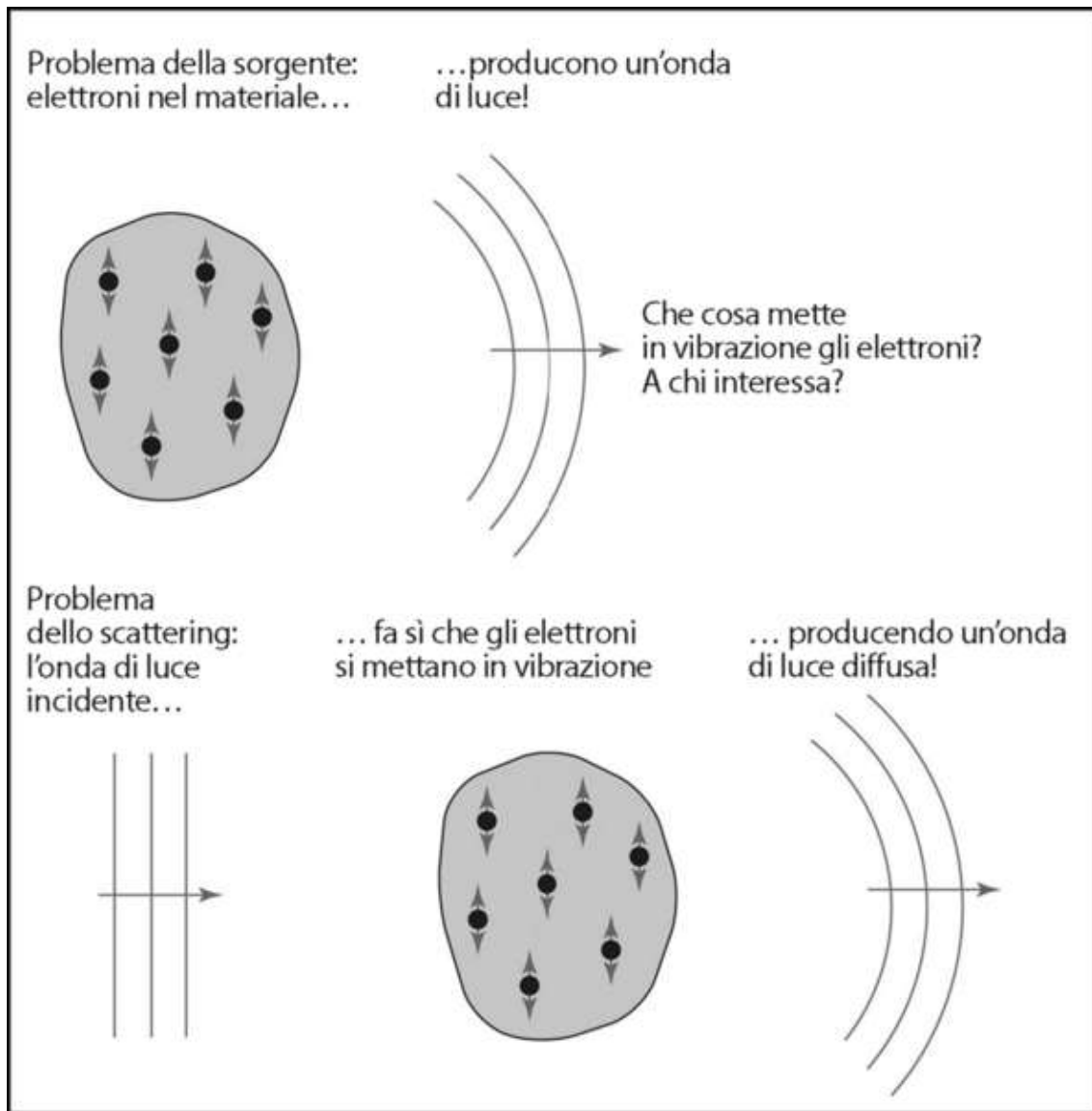
Figura 12.3 La fisica del problema della sorgente e del problema dello scattering.

Quante misurazioni dobbiamo effettuare, quindi – cioè, di quante direzioni di illuminazione abbiamo bisogno per poter ricostruire un'immagine tridimensionale del nostro oggetto. Nel 1978, Devaney ha dimostrato teoricamente che è possibile costruire un oggetto che sia invisibile per qualsiasi numero *finito* di direzioni di illuminazione, mettendo un'ipoteca seria sulla possibilità che il problema dello scattering non abbia una soluzione unica[17]. A questi oggetti

possibilmente invisibili è stato dato il nome tecnico e poco entusiasmante di “nonscattering scatterer” e quella sulla loro esistenza (o non esistenza) è diventata una domanda importante.

La domanda ha tenuto impegnati Emil e i suoi colleghi, ma finalmente, nel 1993, Wolf e Tarek Habashy hanno dimostrato teoricamente, almeno per oggetti con proprietà di scattering deboli, che se si effettuano misurazioni di scattering per un numero *infinito* di direzioni, il problema inverso dello scattering ha una soluzione unica[18]. Qualche anno prima, il matematico Adrian Nachman aveva dato una dimostrazione matematica generale dell’unicità della soluzione per il problema inverso dello scattering, apparentemente per tutti gli oggetti che generano scattering[19].

Il risultato a prima vista può sembrare poco rassicurante, perché non potremo mai effettuare un numero infinito di misurazioni. Quello però che hanno mostrato Wolf, Habashy e Nachman, è che il problema inverso dello scattering è un processo di eliminazione, simile a quello della tomografia computerizzata, descritto nel capitolo precedente. Quante più misurazioni si effettuano dell’oggetto da direzioni di illuminazione diverse, tanto più piccolo può diventare il numero delle possibili strutture dell’oggetto che diffonde la luce. La struttura non sarà mai nota perfettamente, ma con un numero di misurazioni sufficiente possiamo determinare un’approssimazione della struttura reale tanto accurata quanto desiderato.

Quando ho iniziato a lavorare al mio dottorato con Emil intorno al 1996, le sue ricerche sui “non-scattering scatterer” mi hanno convinto che l’invisibilità perfetta non fosse possibile. Il suo lavoro teorico era corretto, ma quello di cui non mi sono reso conto è che si applicava solo a una certa classe di oggetti disperdenti. La classe degli oggetti disperdenti comprende oggetti realizzati con quasi tutti i materiali che si trovano in natura, ma che cosa succederebbe se si tentasse di

costruire un oggetto invisibile con materiali che in natura non sono presenti? Questa sarebbe stata l'intuizione che ha portato all'introduzione di mantelli dell'invisibilità e al gran fiorire di ricerche che ne è seguito.

Ho continuato a lavorare con Emil e a fargli visita anche quando sono diventato ricercatore post-dottorato e il mio saggio finale con lui è stato pubblicato nel 2004. Una volta Emil ha detto che il lavoro con Born era stato "prezioso per me in modo indescrivibile, perché mi ha permesso di vederlo e di parlare con lui ogni giorno"[20]. Emil aveva preso in prestito quella frase da Born, che aveva detto la stessa cosa del suo rapporto con Albert Einstein. A mia volta, ricordo il tempo passato a lavorare con Emil come prezioso per me in modo indescrivibile.

---

1 Nota all'epigrafe: F. Scarlett Potter, *The Were-Wolf of the Grendelwold* (1882), ristampato in Easley e Scott, *Terrifying Transformations*.

2 Kerker, "Invisible Bodies".

3 Dai miei ricordi di conversazioni personali con Emil Wolf.

4 Dai miei ricordi di conversazioni personali con Emil Wolf.

5 Wolf in seguito ricordava che Born stava anche evitando eventuali problemi di copyright legati al suo vecchio libro. Poiché era un ebreo tedesco, Born si vide sequestrati i diritti del suo libro dai nazisti quando presero il potere; quando poi i nazisti furono sconfitti, gli alleati presero possesso dei diritti del suo libro come spoglie di guerra. Quando Born annunciò che stava lavorando a un nuovo libro di ottica, il detentore dei diritti lo contattò e gli chiese quali parti del vecchio libro intendeva utilizzare, in modo da potergli fatturare il corrispettivo; sostanzialmente, Born gli rispose di andare a quel paese.

6 Dai miei ricordi di conversazioni personali con Emil Wolf.

7 Wolf, "Optics in Terms of Observable Quantities".

8 Wolf, "Recollections of Max Born", p. 12.

9 Ivi, p. 15.

10 *Ibidem*.

11 Wolf, "Three-Dimensional Structure Determination of Semi-Transparent Objects".

12 Uno dei miei grandi rimpianti è che, pur avendo lavorato a lungo con Emil Wolf, non gli ho mai chiesto come avesse iniziato a interessarsi alle sorgenti non radianti.

13 Devaney e Wolf, “Radiating and Nonradiating Classical Current Distributions”. Devaney sarebbe diventato un pioniere nell’uso della tomografia a diffrazione per l’esplorazione sismica.

14 Devaney e Wolf, “Radiating and Nonradiating Classical Current Distributions”. Devaney sarebbe diventato un pioniere nell’uso della tomografia a diffrazione per l’esplorazione sismica.

15 Gbur, “Sources of Arbitrary States of Coherence”.

16 Gbur, “Nonradiating Sources and the Inverse Source Problem”.

17 Devaney, “Nonuniqueness in the Inverse Scattering Problem”.

18 Wolf e Habashy, “Invisible Bodies”.

19 Nachman, “Reconstructions from Boundary Measurements”.

20 Wolf, “Recollections of Max Born”, p. 15.

Capitolo 13

Materiali che non si trovano in natura

"Kirk era sempre stato l'esteta della famiglia. Pensava che le parti brutte delle strutture pubbliche potessero essere verniciate con quella sostanza chimica. Ponti e cose simili. Per renderli più attraenti."
"Non credo di capire."
"Be', poiché il sulfaborgonio è un anti-pigmento e forma una barriera ai raggi di luce, naturalmente renderebbe le parti brutte invisibili. Tuttavia, non penso…"
"Aspettate un minuto. Vi dispiacerebbe ricominciare, dottore?"
"Prego?"
"Avete usato la parola *invisibile*?"
– Henry Slesar, *The Invisible Man Murder Case* (1958) [trad. it. p. 79]

Nel 1980, il fisico tedesco Otto Wiener condusse un esperimento che si sarebbe dimostrato una pietra miliare nello studio della luce. Nel 1862, James Clerk Maxwell aveva ipotizzato che la luce fosse un'onda elettromagnetica; nel 1889, Heinrich Hertz aveva dimostrato che le ù esistono, nella forma delle onde radio. Anche se a quel punto c'erano relativamente pochi dubbi che la luce fosse un'onda elettromagnetica, erano stati condotti pochi esperimenti per confermarlo.

Hertz aveva dimostrato l'esistenza di onde radio stazionarie facendole riflettere da uno specchio. Wiener preparò un esperimento analogo per la luce, ma si trovava di fronte a un problema: la lunghezza d'onda delle onde di luce è molto minore di quella delle onde radio. La lunghezza d'onda della luce blu, per esempio, è di circa un miliardesimo di metro; un esperimento di interferenza con luce blu

produrrebbe frange luminose e scure distanti circa un miliardesimo di metro, impossibili da osservare a occhio nudo. Wiener concepì uno schema semplice e brillante: depositò una pellicola fotografica molto sottile su una lastra di vetro e inclinò leggermente la lastra rispetto allo specchio. L'inclinazione estendeva la figura d'interferenza per la lunghezza della pellicola, rendendola abbastanza grande da poter essere misurata (Figura 13.1).
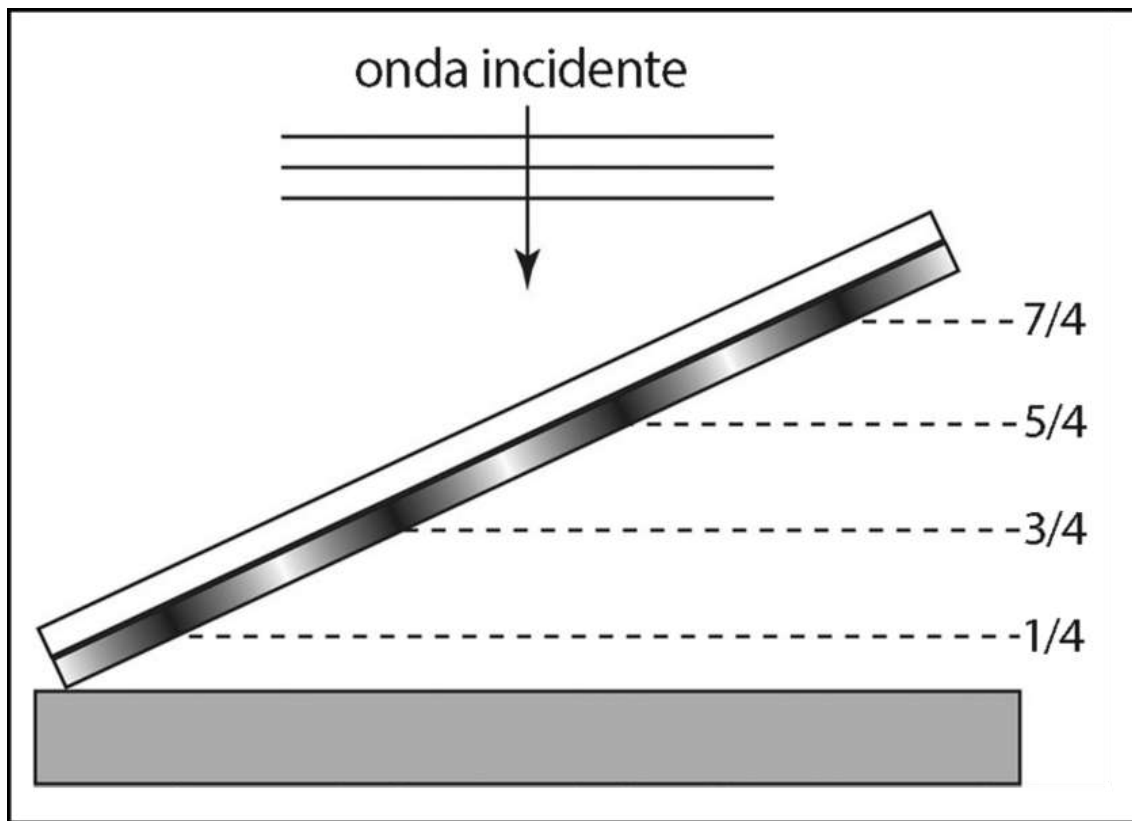
Figura 13.1 L'esperimento di Wiener: i punti scuri sulla pellicola fotografica, che indicano che la pellicola è stata esposta alla luce, compaiono in corrispondenza di quarti di lunghezza d'onda.

L'obiettivo dell'esperimento era mettere alla prova alcune previsioni molto particolari che emergevano dalle equazioni di Maxwell. Maxwell aveva previsto che le onde stazionarie dei campi elettrici e magnetici comparissero in posizioni spaziali diverse. I punti luminosi del campo elettrico iniziano a un quarto di lunghezza d'onda dalla

superficie dello specchio e poi compaiono separati da distanze pari a mezza lunghezza d'onda. I punti luminosi del campo magnetico, invece, iniziano in corrispondenza della superficie dello specchio e poi ogni mezza lunghezza d'onda. Nell'eseguire l'esperimento, Wiener scoprì che la pellicola fotografica non era stata sviluppata in corrispondenza della superficie dello specchio: questo indicava che la pellicola era stata sviluppata dal campo elettrico dell'onda luminosa. "Nei nodi delle forze elettriche – concluse – vi è un minimo dell'effetto chimico, negli antinodi un massimo; ovvero: l'effetto chimico dell'onda di luce è legato alla presenza delle oscillazioni delle forze elettriche e non di quelle magnetiche."[1] Wiener aveva scoperto, quasi come un ripensamento, che l'"ingrediente attivo" della luce è il campo elettrico. Si sarebbe scoperto che è vero per la maggior parte dei materiali naturali, quando esposti alla luce visibile: il materiale interagisce con il campo elettrico, non con il campo magnetico dell'onda elettromagnetica.

Un materiale che interagisse anche con un campo magnetico, però, si comporterebbe in modo molto diverso e avrebbe proprietà molto interessanti. Per i materiali ordinari, che reagiscono solo con il campo elettrico, la teoria di Maxwell prevede che quasi sempre ci sarà un'onda di luce riflessa. La teoria prevede però anche che un materiale con la giusta combinazione di risposte elettriche e magnetiche potrebbe non generare riflessione; in sostanza, le onde riflesse create dalle risposte elettriche e magnetiche del materiale potrebbero cancellarsi a vicenda: le onde riflesse interferirebbero distruttivamente.

L'applicazione militare del fenomeno non sfuggì a scienziati e ingegneri durante la Seconda guerra mondiale. Il fisico tedesco Arnold Sommerfeld, che oggi è considerato uno dei grandi scienziati dell'ottica, più tardi ricordava il suo lavoro in questo campo: "Nel corso della guerra si presentò il problema di trovare, come

contromisura contro i radar alleati, uno strato superficiale non riflettente (‘nero’) di piccolo spessore. Questo strato doveva essere particolarmente non riflettente per onde radar incidenti perpendicolarmente o quasi”[2]. Il radar era un’altra tecnologia nata dalla scoperta delle onde radio da parte di Heinrich Hertz. La tecnica di *RAdio Detection And Ranging* utilizza le onde radio per individuare oggetti in modo simile a come un pipistrello utilizza gli echi acustici: una stazione radar invia segnali nell’aria e cerca echi di ritorno da aerei nemici.

Sommerfeld e i suoi colleghi, in sostanza, cercavano di scoprire (o di creare) un nuovo materiale che non riflettesse le onde radar, un materiale che eliminasse la riflessione utilizzando una combinazione di risposte elettriche e magnetiche. Non è chiaro che abbiano fatto progressi significativi verso questo obiettivo, ma un approccio simile è stato usato nella progettazione del bombardiere stealth B-2 Spirit degli Stati Uniti. Il bombardiere risulta meno rilevabile dal radar grazie a due scelte progettuali principali: la sua forma e il suo materiale. Il radar è un sistema di rilevamento attivo; la stazione radar invia un impulso e cerca di individuare un segnale che rimbalza indietro dopo avere colpito un obiettivo. Un aereo comune, con uno scafo arrotondato, tende a riflettere le onde radar in tutte le direzioni, e in questo modo almeno alcune torneranno alla stazione radar e verranno rilevate. Il bombardiere stealth ha un fondo piatto, il che significa che le onde radar vengono riflesse principalmente in una direzione unica, nel rispetto della legge della riflessione. Poiché queste onde vengono riflesse in un’unica direzione, è meno probabile che raggiungano una stazione radar a terra e vengano rilevate.

Il materiale di un bombardiere stealth è un composito carbonio-grafite che assorbe una quantità significativa dell’energia radar incidente. Con un’apertura alare di 52,5 metri e una lunghezza di 21, il

bombardiere ha una sezione trasversale al radar di circa 0,09 metri quadrati, il che lo rende, per quanto riguarda il rilevamento radar, grande quanto una palla da basket. Il bombardiere stealth moderno ha raggiunto in gran parte l'invisibilità al radar che Sommerfeld sognava.

Questo ci porta, finalmente, alla genesi della fisica moderna dell'invisibilità e a una branca del tutto nuova dell'ottica scientifica. Alla metà degli anni Novanta, anche ricercatori dell'azienda GEC-Marconi, con sede nel Regno Unito, lavoravano a tecniche per ridurre la sezione trasversale di strutture al radar e avevano sviluppato un materiale basato sul carbonio che era molto efficace nell'assorbimento delle onde radar. Non avevano idea, però, del perché quel materiale fosse tanto efficace. Hanno chiesto a John Pendry, professore di fisica teorica all'Imperial College di Londra, se poteva risolvere il mistero.

Su una scala molto piccola, il materiale era costituito da fibre di carbonio estremamente sottili sovrapposte; la struttura ricorda la "foresta" di fibre di carbonio che conferisce alla vernice Vantablack il suo colore estremamente nero. Pendry si è reso conto che le caratteristiche peculiari di assorbimento delle onde radar del materiale della Marconi derivavano da quella struttura.

Questa osservazione è stata di grandissima importanza. Per la maggior parte della storia dell'ottica, i ricercatori avevano manipolato il comportamento della luce nei materiali mediante la chimica: scegliendo un materiale con le proprietà chimiche giuste, si può ottenere il risultato ottico desiderato. Il materiale della Marconi faceva capire che è possibile anche modificare le proprietà ottiche di un materiale modificando la struttura del materiale a una scala inferiore alla lunghezza d'onda. Con quelle manipolazioni della struttura del materiale, è poi possibile, in linea di principio, progettare materiali con proprietà ottiche che in natura non si trovano.

Pendry e colleghi alla GEC-Marconi hanno esplorato le possibilità nell'arco degli anni successivi. Nel 1996, hanno dimostrato sul piano teorico che le proprietà ottiche di un metallo possono essere modificate drasticamente se il metallo è disposto secondo una struttura periodica di fili molto sottili; in sostanza, hanno dimostrato di poter spostare le proprietà ottiche interessanti del materiale dall'intervallo della luce visibile a quello dell'infrarosso[3].

Poi, Pendry e i ricercatori della Marconi si sono concentrati sullo stesso tipo di problema che aveva tenuto impegnato Sommerfeld una cinquantina d'anni prima: come progettare un materiale che possieda una risposta magnetica oltre che una risposta elettrica. Nel 1999 hanno pubblicato i loro primi risultati teorici, in un articolo intitolato "Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena"[4], dove presentavano per la prima volta l'uso in ottica di una struttura nota come risonatore ad anello diviso. Questa struttura è costituita da una coppia di cilindri metallici dotati di una fessura, uno all'interno dell'altro (Figura 13.2). Un materiale artificiale sarebbe consistito di un gran numero di queste strutture, di dimensioni inferiori alla lunghezza d'onda, impaccate fra loro. Questi risonatori si comportano, in un certo senso, come canne d'organo per la luce: scegliendo opportunamente le dimensioni dei cilindri, la distanza tra l'uno e l'altro e il metallo di cui sono fatti, è possibile generare una risposta elettrica e magnetica desiderata a una frequenza data, in linea di principio anche per la luce visibile, se i risonatori possono essere costruiti a dimensioni sufficientemente piccole. In altre parole, è possibile fare in modo che gli anelli divisi "risuonino" a una frequenza desiderata.
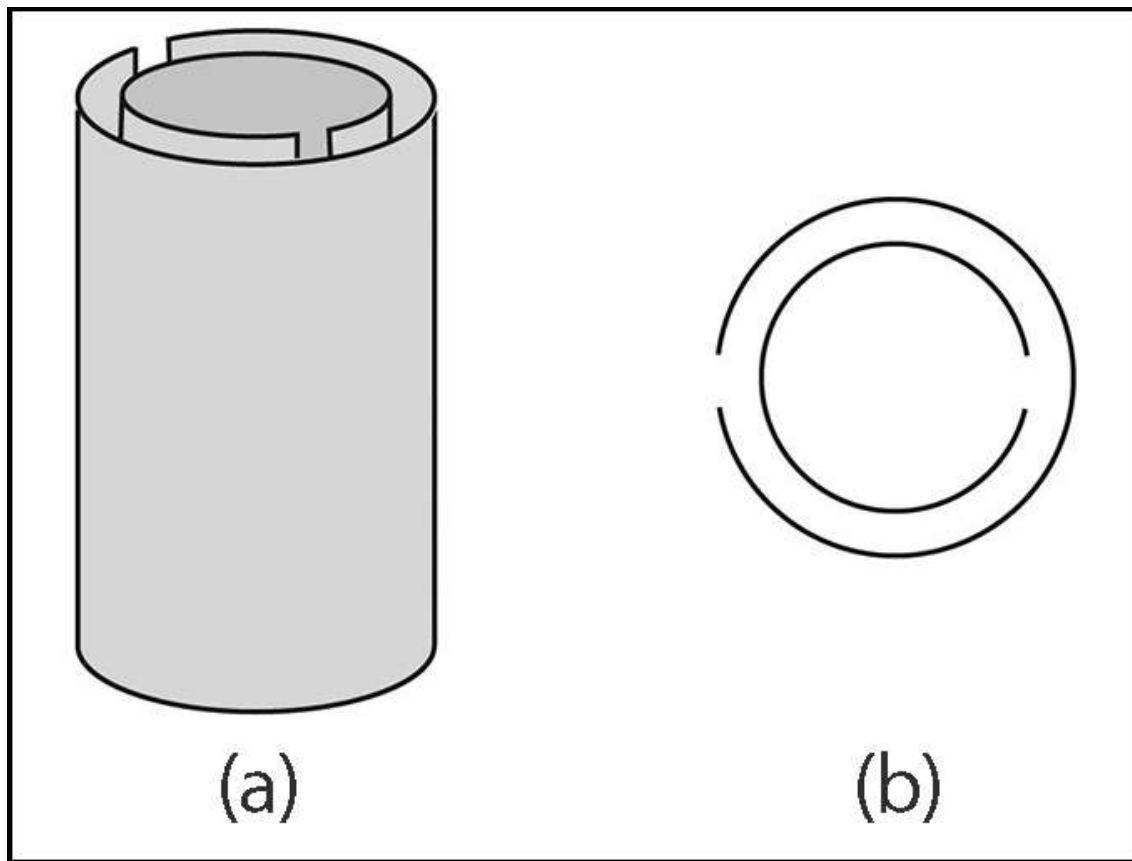
Figura 13.2 Vista laterale (a) e dall'alto (b) di un risonatore ad anello diviso.

Pendry ha presentato i suoi risultati sul risonatore ad anelli divisi al convegno Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (PECS) di Laguna Beach, in California, nel 1999. Ha anche scelto un nome per questi nuovi materiali artificiali con proprietà ottiche che non si trovano in natura: metamateriali. *Meta* è la parola greca per "oltre": il termine "metamateriali" si riferisce a materiali con proprietà che "vanno oltre" quello che si trova in natura. In particolare, Pendry ha descritto materiali le cui proprietà ottiche derivano in gran parte dalla loro *struttura* e non dalla loro chimica.

Al convegno di Laguna Beach partecipavano anche David R. Smith e Sheldon Schultz del Dipartimento di Fisica dell'Università della California a San Diego, i quali notarono una conseguenza incredibile

del lavoro di Pendry: mediante l'uso di risonatori ad anello diviso, è possibile non solo ottenere un materiale con un'ampia varietà di risposte magnetiche ed elettriche, ma anche mettere a punto quelle proprietà in modo da rendere *negativo* l'indice di rifrazione della luce. Nel passaggio da un mezzo ordinario a un mezzo negativo, la luce viene rifratta dal lato *opposto* rispetto alla perpendicolare alla superficie (Figura 13.3). Smith e Schultz hanno parlato con Pendry di questa e altre sconcertanti possibilità durante il convegno di Laguna Beach, e questo ha portato a una collaborazione di lungo periodo.
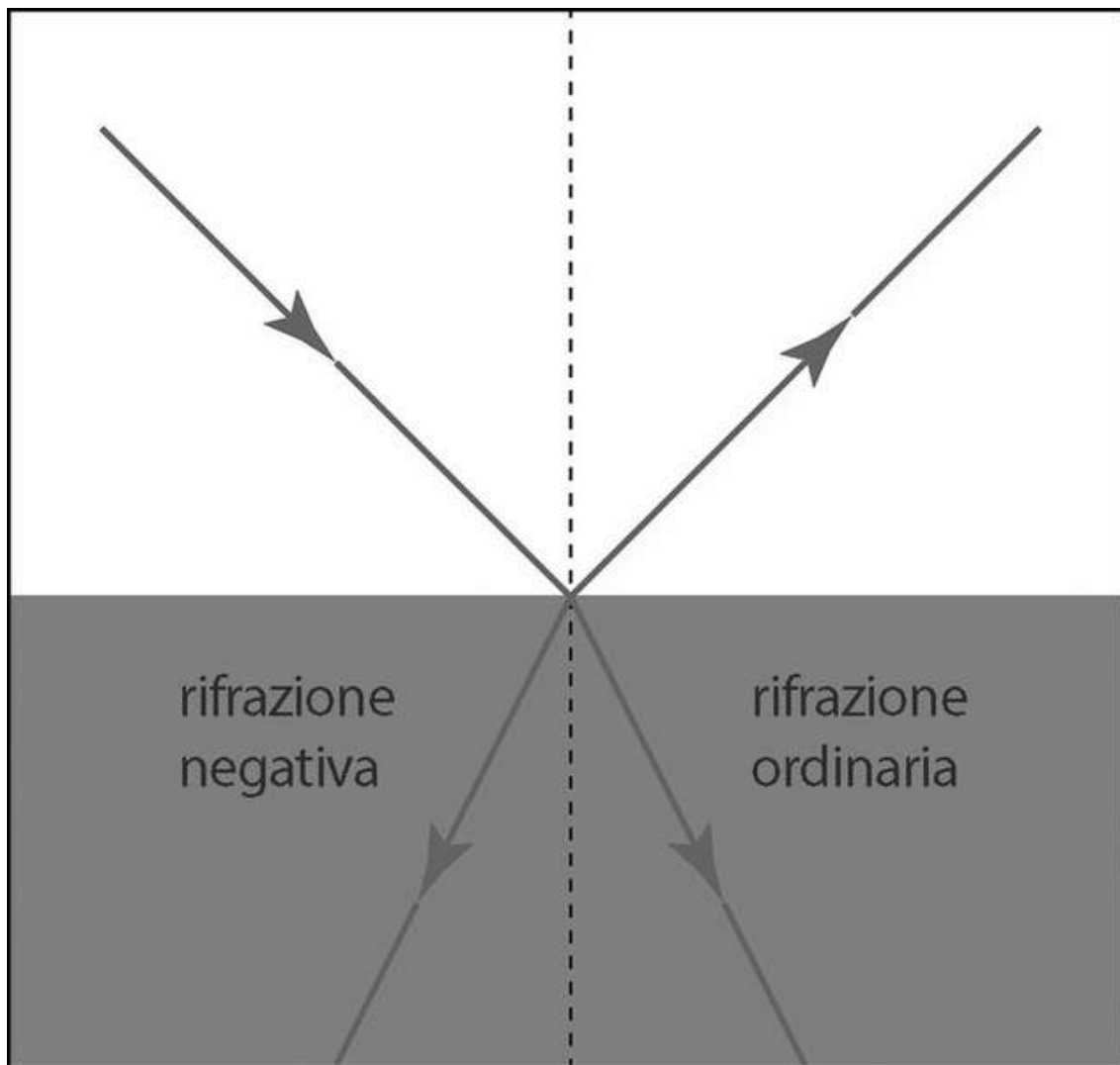
Figura 13.3 Rifrazione ordinaria e negativa.

Con altri colleghi di San Diego, Smith e Schultz hanno scritto vari articoli in cui hanno analizzato, sul piano teorico, come realizzare un mezzo con una rifrazione negativa, e nel 2001 hanno pubblicato la prima dimostrazione sperimentale di un materiale con un indice negativo di rifrazione[5]. Il materiale è stato progettato per le microonde, con una lunghezza d'onda centrale di 3 centimetri; le strutture ad anello diviso così potevano essere costruite alle ragionevoli dimensioni di 5 millimetri. (Per la luce visibile, con una lunghezza d'onda di un miliardesimo di metro, una struttura ad anello diviso dovrebbe essere nell'ordine del decimo di miliardesimo di metro.)

L'interesse per i materiali con indice di rifrazione negativo era sia pratico che scientifico. Nel 1967, il fisico russo-sovietico Victor Vesalago aveva pubblicato un saggio teorico in cui sosteneva che materiali con indice di rifrazione negativo sono fisicamente possibili, e spiegava le implicazioni di tali materiali. Fra le molte conseguenze sorprendenti, Vesalago notava che una lastra piana di materiale con indice di rifrazione negativo si comporterà come una lente: a differenza delle lenti comuni, per focalizzare la luce non è necessario che le superfici possiedano una curvatura (Figura 13.4). Quando è stato pubblicato, l'articolo di Vesalago è passato pressoché inosservato, ma i ricercatori dell'Università di San Diego lo hanno riscoperto e lo hanno utilizzato come punto d'avvio per i loro studi sui materiali con indice di rifrazione negativo[6].
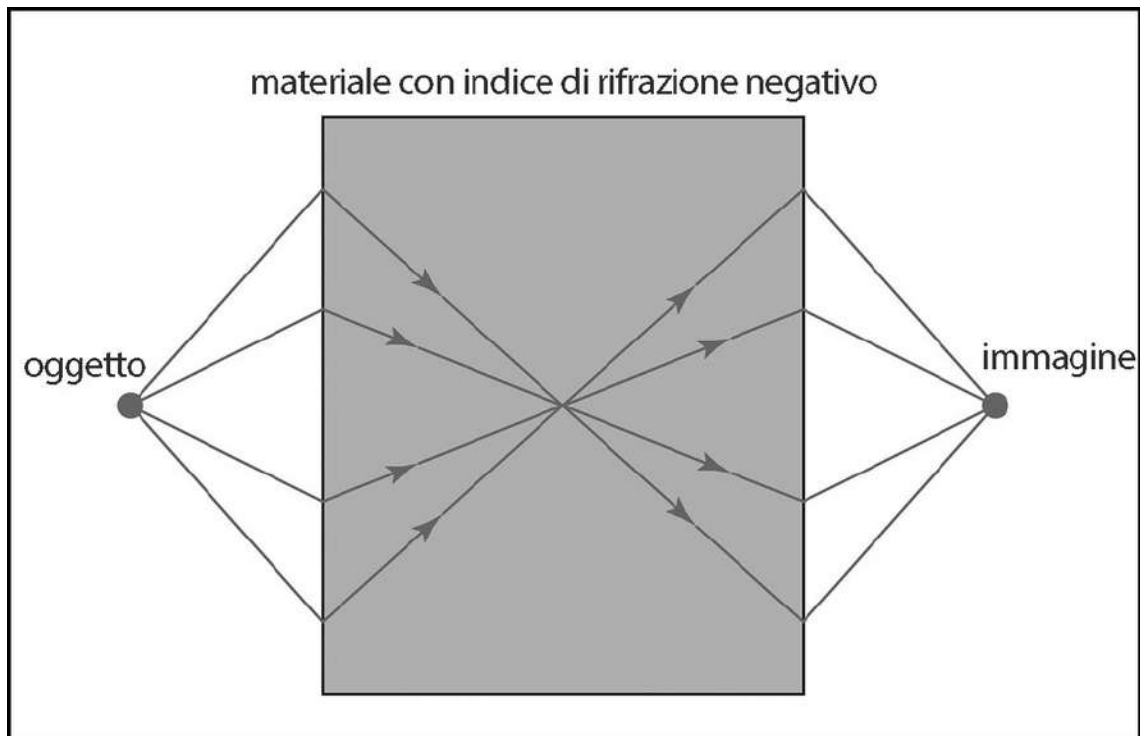
Figura 13.4 Una lente con indice di rifrazione negativo n = -1, sospesa in aria (indice n = 1). I raggi vengono rifratti due volte e formano un'immagine dall'altro lato della lente.

Le lenti comuni hanno una risoluzione limitata, che deriva dalla natura ondulatoria della luce. In sostanza, poiché un'onda di luce si disperde sempre, di solito non è possibile concentrarla in un punto di dimensioni inferiori a una lunghezza d'onda. Questo significa che le immagini di oggetti distanti fra loro meno di una lunghezza d'onda finiscono per confondersi l'una con l'altra e non si possono distinguere individualmente. Sin dalle origini della teoria ondulatoria della luce, questo è stato considerato un limite più o meno fondamentale dei sistemi ottici.

Nel 2000, però, John Pendry si è incuriosito delle proprietà della lente piana di Vesalago, e ha eseguito qualche calcolo per stabilirne la risoluzione. È rimasto stupito quando ha scoperto che una lente del genere è in linea di principio perfetta: se è utilizzata per ottenere l'immagine di un oggetto puntiforme, creerà un'immagine puntiforme.

All’inizio del XX secolo, gli studi delle strutture anatomiche erano limitati dall’impossibilità di risolvere, con i microscopi comuni, gli atomi; sembrava, invece, che la lente di Vesalago potesse creare un’immagine ottica perfetta di qualsiasi oggetto, non importa quanto piccolo.

Pendry ha pubblicato il suo risultato nel 2000, in un articolo intitolato provocativamente “Negative Refraction Makes a Perfect Lens”[7]. Dire che ha suscitato un putiferio nella comunità scientifica sarebbe poco; i ricercatori hanno fatto a gara per dimostrare che Pendry avesse torto. A quel tempo ero ancora uno studente di dottorato, ed Emil Wolf ha ricevuto almeno una richiesta di fare da coautore di un articolo scritto di tutta fretta che cercava di confutare i risultati di Pendry; saggiamente non si è fatto coinvolgere.

Oggi, tutti sono d’accordo che i calcoli di Pendry sono corretti. La lente, però, non è ancora perfetta; quando si prendono in considerazione gli aspetti pratici, come l’assorbimento della luce nella lente, si scopre che, al di là del limite di risoluzione delle lenti tradizionali, esistono anche altri limiti che impediscono di raggiungere la perfezione. La lente di Vesalago non è ancora sufficiente per ottenere immagini degli atomi; può comunque offrire una risoluzione migliore delle lenti comuni.

La “super-risoluzione” della lente di Vesalago è stata confermata in vari esperimenti. Nel 2004, ricercatori dell’Università di Toronto hanno progettato una superlente per microonde, confermando che il suo potere di risoluzione era maggiore di quello che può dare una lente comune[8]. Produrre una superlente per la luce visibile, con una lunghezza d’onda molto più piccola, è significativamente più problematico. Nel 2005, comunque, ricercatori dell’Università della California a Berkeley hanno dimostrato che una semplice lastra sottile

d’argento si comporta in modo simile a una lente di Vesalago e può dare una super-risoluzione[9].

Per le frequenze ottiche, il problema è la fabbricazione dei metamateriali. Per poter creare una lente perfetta o un materiale con rifrazione negativa, bisogna poter controllare la struttura del materiale, in tre dimensioni, su una scala inferiore a quella della lunghezza d’onda. Si può capire quale sia la difficoltà se si immagina che i “meta-atomi”, le unità fondamentali del metamateriale, siano blocchi da costruzione di un decimiliardesimo di metro di lato. Il compito, a quel punto, è assemblare perfettamente questi blocchi estremamente piccoli in una struttura che abbia una lunghezza totale di vari centimetri. A questo punto, non abbiamo ancora un metodo efficiente ed economico per farlo, ma sarebbe un errore dare per scontato che non sia possibile, considerato fin dove è arrivata la scienza.

L’annuncio della lente perfetta si può dire che segni l’inizio di un’epoca del tutto nuova per l’ottica fisica. Per tutta la storia delle scienze naturali, gli scienziati e i filosofi si sono chiesti: “Che cos’è la luce?” e “Che cosa può fare la luce?”. Con l’introduzione dei metamateriali, ora i ricercatori si chiedono: come possiamo far fare alla luce tutto quello che vogliamo che faccia?

Molte delle regole che gli scienziati nel campo dell’ottica hanno dovuto rispettare per anni ora si sono dimostrate piuttosto delle linee guida. Questo naturalmente ha portato molti ricercatori a chiedersi che cos’altro si possa fare con simili materiali. Una risposta, come ora vediamo, era… progettare un mantello dell’invisibilità.

---

1 Wiener, “Stehende Lichtwellen”, pp. 240-41.

2 Sommerfeld, *Optics*, p. 18.

3 Pendry et al., “Extremely Low Frequency Plasmons”.

4 Pendry et al., “Magnetism from Conductors”.

5 Smith et al., “Composite Medium”; Smith e Kroll, “Negative Refractive Index”; Shelby et al., “Experimental Verification”.

6 Vesalago, “Electrodynamics of Substances”. Per fortuna, Victor Vesalago è vissuto abbastanza da vedere ampiamente apprezzato il suo lavoro. Prima che morisse nel 2018, fu invitato a molti convegni internazionali per esporre le sue idee. A un convegno, mi è capitato di vederlo a un certo punto seduto da solo e ho colto l’occasione per presentarmi e ringraziarlo per i suoi contributi.

7 Pendry, “Negative Refraction Makes a Perfect Lens”.

8 Grbic e Eleftheriades, “Overcoming the Diffraction Limit”.

9 Fang et al., “Sub-Diffraction-Limited Optical Imaging”.

Capitolo 14

Appaiono i mantelli dell’invisibilità

> L’Invisible Weapons Carrier era, in effetti, una mezza tonnellata di realtà. Era abbastanza capace, internamente, da contenere un uomo e una bomba a fusione, insieme con l’alimentazione per il motore e gli amplificatori di luce. Era rivestito con un tappeto rigido di bastoncini conduttori di luce in plastica flessibile, le cui estremità, raggruppate in un mosaico compatto che puntava all’esterno in ogni direzione possibile, riuscivano a piegare la luce intorno alla sua massa.
> – Algis Budrys, *For Love* (1962)

La lente perfetta di Vesalago e Pendry era, in un certo senso, troppo perfetta: l’immagine che produceva era esattamente delle stesse dimensioni dell’oggetto, il che la rendeva inadatta ad applicazioni come la microscopia: nella microscopia tradizionale, l’immagine prodotta è ingrandita a dimensioni tali che ne consentano la registrazione o la rendano visibile a occhio nudo. La lente perfetta, se utilizzata per ottenere l’immagine di un oggetto che non si può vedere a occhio nudo, produrrà un’immagine che a sua volta non è visibile a occhio nudo.

Subito dopo la pubblicazione dell’articolo del 2000 sulla lente perfetta, Pendry ha iniziato a cercare modi per modificare la lente e produrre un’immagine ingrandita. La lente risultante non sarebbe stata più perfetta, ma avrebbe avuto un uso più pratico. Nel 2002 e nel 2003, Pendry ha presentato nuovi progetti per le lenti a ingrandimento, con l’ausilio di un nuovo strumento matematico che era andato

sviluppando dalla metà degli anni Novanta e che va sotto il nome di ottica di trasformazione[1].

I problemi della fisica e dell'ottica sono diventati sempre più complicati, e i ricercatori hanno fatto sempre più ricorso a simulazioni al computer. Nel caso dell'ottica, questo comporta l'uso di un computer per risolvere le equazioni di Maxwell. Quando la luce si propaga in una struttura molto complicata, però, può essere difficile preparare i calcoli, e la loro elaborazione può richiede un tempo molto lungo. I calcoli si effettuano rappresentando lo spazio su un reticolo discreto, in cui il campo elettromagnetico viene valutato in corrispondenza dei nodi del reticolo. Nel 1996, Pendry e un suo studente, Andrew Ward, hanno mostrato che molti calcoli possono essere semplificati effettuando una distorsione matematica del reticolo, in modo che corrisponda meglio alla struttura ottica effettiva da studiare (Figura 14.1)[2].
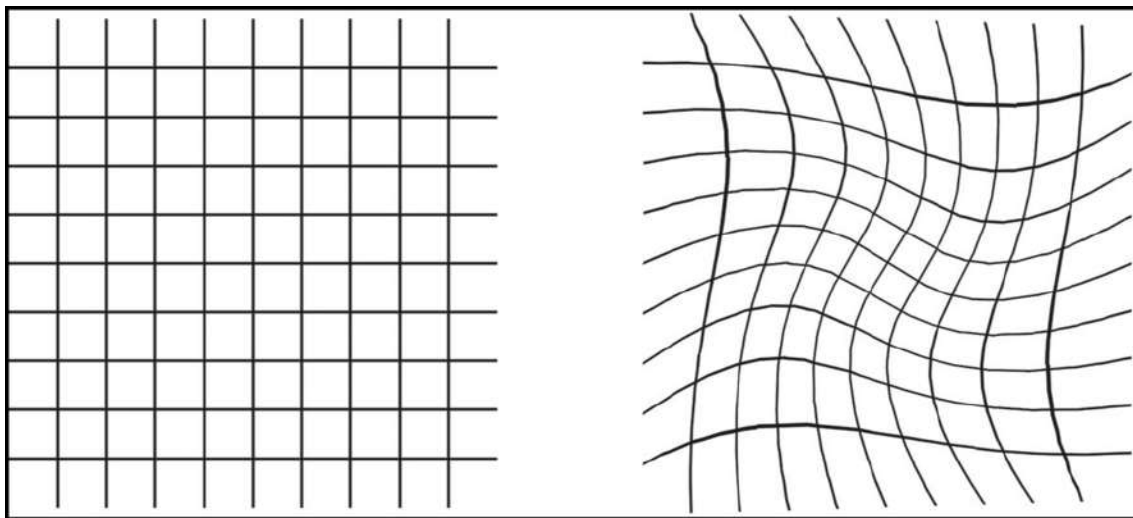
Figura 14.1 Una distorsione di un reticolato discreto per l'ottica di trasformazione. Il reticolato originale è a sinistra, quello distorto a destra.

Nel loro lavoro, Pendry e Ward hanno notato una proprietà curiosa delle equazioni di Maxwell: si può sempre trovare, almeno in linea di principio, un materiale ottico che si comporti come qualsiasi

distorsione desiderata dello spazio. Questo ha suggerito una nuova strategia: se si vuole progettare un materiale che manipoli la luce in un certo modo, prima si determina la distorsione dello spazio che produrrà quella manipolazione. Nota la distorsione, si possono usare le equazioni di Maxwell per stabilire la struttura materiale che produrrà quell'effetto ottico.

L'ottica di trasformazione utilizza gli stessi strumenti matematici che Albert Einstein ha utilizzato per formulare la sua teoria generale della relatività, anche se con un'interpretazione molto diversa. Nella concezione einsteiniana della gravità, un oggetto dotato di grande massa curva lo spazio e il tempo nelle sue vicinanze, e questo influisce sulle traiettorie di altri oggetti materiali e della luce in movimento nello spazio. L'ottica di trasformazione usa la stessa matematica dello spazio distorto, ma come strumento per progettare dispositivi ottici.

Tenendo presente questo, era quasi naturale immaginare una distorsione dello spazio che guidi la luce intorno a una regione di spazio centrale nascosta e la rimetta sulla sua strada come se non avesse incontrato nulla: un mantello dell'invisibilità (Figura 14.2). Per prima cosa immaginiamo una regione dello spazio ordinario, con la griglia che permette di calcolare la distanza relativa tra due punti qualsiasi nello spazio. Poi immaginiamo di praticare un forellino nello spazio e di stirare quel forellino fino a farlo diventare un foro di dimensioni finite. Nel tirarlo, pieghiamo e distorciamo lo spazio circostante per fargli spazio. Anche le onde di luce che arrivano in questa regione vengono distorte e fatte passare all'esterno della regione centrale occultata. Una volta che abbiamo una distorsione matematica che fa quello che vogliamo, passiamo alle equazioni di Maxwell per trovare la struttura materiale equivalente che riproduce quella distorsione.
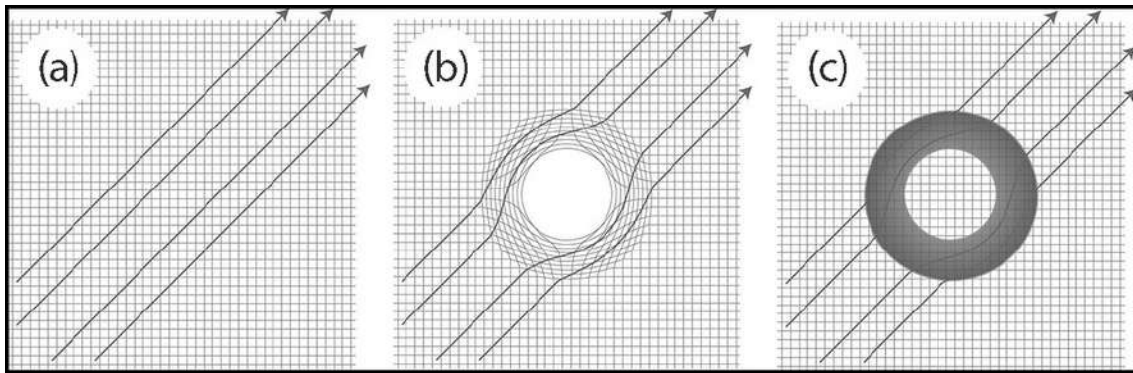
Figura 14.2 La distorsione dello spazio che produce un mantello dell'invisibilità, e l'equivalente struttura materiale che emula quel mantello. I raggi di luce, disegnati in diagonale, passano attraverso l'oggetto; i loro tragitti sono distorti esattamente come lo spazio.

Nel 2005, Pendry aveva le idee abbastanza chiare su come utilizzare l'ottica di trasformazione per creare un mantello dell'invisibilità. Nell'aprile di quell'anno, Valerie Browning della DARPA (U.S. Defense Advanced Research Projects Agency) stava organizzando un convegno sui metamateriali a San Antonio, in Texas, e ha chiesto a Pendry di tenere una presentazione. Gli ha chiesto specificamente di "vivacizzare un po' le cose", e Pendry ha deciso che una presentazione sulla possibilità dei mantelli dell'invisibilità era il modo migliore per dimostrare l'utilità dell'ottica di trasformazione, una tecnica che era sostanzialmente sconosciuta alla comunità scientifica. Lo ha raccontato lui stesso.

> A quell'epoca stavo lavorando sulla teoria dell'ottica di trasformazione, uno strumento progettuale molto potente nell'elettromagnetismo, che avevo sviluppato, e pensavo sarebbe stato divertente mostrare come rendere gli oggetti invisibili alla radiazione elettromagnetica. Mia moglie mi ha suggerito di fare riferimento a un tale che si chiamava Harry Potter, che non avevo mai sentito nominare, ma che a quanto pareva aveva qualcosa a che fare con i mantelli. Quello che per me era solo uno scherzo divertente è stato preso estremamente sul serio, e i mantelli dell'invisibilità da allora sono diventati un tema importante nella comunità dei metamateriali.[3]

David Smith, ora alla Duke University, non aveva potuto partecipare al convegno di San Antonio, ma ha saputo dell'idea del mantello e si è offerto immediatamente di lavorare a un progetto sperimentale. Il suo gruppo di ricerca, perciò, ha avuto un buon vantaggio nella realizzazione di un mantello dell'invisibilità, prima che venissero pubblicati ufficialmente i primi articoli teorici.

Come accade spesso nella scienza, però, Pendry non era l'unico che avesse pensato alla possibilità di un mantello dell'invisibilità. Nel luglio del 2002, Ulf Leonhardt, allora all'Università di Saint Andrews, ha seguito un miniprogramma di ottica quantistica al Kavli Institute for Theoretical Physics a Santa Barbara, in California. Fra i temi di discussione c'erano i metamateriali e la rifrazione negativa, ed erano presenti sia John Pendry che David Smith, che sono intervenuti parlando del loro lavoro sulla rifrazione negativa.

Da alcuni anni Leonhardt si interessava al rapporto fra l'ottica e la teoria generale della relatività di Einstein: aveva pubblicato un primo articolo sull'argomento nel 1999, dimostrando come certi sistemi ottici in movimento possano imitare il comportamento di un buco nero[4]. Al convegno, a proposito dei metamateriali, ricorda Leonhardt, "Ho seguito gli interventi di David Smith e John Pendry, ho sentito le argomentazioni pro e contro la rifrazione negativa e ho scoperto il concetto di metamateriali e le loro dimostrazioni sperimentali. Per me è stato immediatamente ovvio che l'argomento successivo in questo campo sarebbe stato il mantello dell'invisibilità"[5]. Al convengo di Santa Barbara, Leonhardt e Pendry hanno discusso a lungo di fisica. Leonhardt ha raccontato quello che sapeva degli analoghi ottici della gravità, e Pendry delle sue idee sui metamateriali. Nessuno dei due ha parlato di mantelli dell'invisibilità, né era consapevole che anche l'altro stesse riflettendo sulla loro possibilità.

La tecnica di Leonhardt per il progetto di un mantello era analoga a quella di Pendry: creare una distorsione matematica dello spazio che funzioni come un mantello e poi determinare la struttura materiale che riproduca quella distorsione. In linea di principio era tutto chiaro, ma farlo funzionare era problematico; Leonhardt si è immerso nella matematica dell'invisibilità per vari anni. Infine, durante un volo per andare a partecipare a un workshop in Messico, nel settembre del 2005, ha capito quale fosse il pezzo mancante per mettere a punto il suo progetto e ha iniziato immediatamente a scrivere un articolo per rendere pubblici i suoi risultati[6].

Riuscire a far pubblicare l'articolo si è rivelato problematico quanto risolvere il problema dell'invisibilità. Leonhardt lo ha inviato a *Nature*, una rivista prestigiosa, che lo ha rifiutato, poi a *Nature Physics*, dalla quale è stato rifiutato dopo due soli giorni. Poi l'ha spedito a *Science*, un'altra rivista prestigiosa, che però lo ha respinto nel giro di due settimane[7].

Agli inizi del 2006, lo ha spedito a *Physical Review Letters*, considerata la rivista principale per la fisica, ma anche lì non ha avuto miglior fortuna. Uno dei revisori però aveva sostenuto che l'articolo non doveva essere pubblicato perché il revisore stesso aveva partecipato a convegni recenti in cui Pendry aveva parlato del suo lavoro (ancora non pubblicato) su un mantello dell'invisibilità, perciò il lavoro di Leonhardt non era un lavoro nuovo! Era, in effetti, un'argomentazione assurda per respingere l'articolo: un lavoro non pubblicato non ha alcun rilievo sulla possibile pubblicazione di un altro lavoro. Leonhardt, su questa base, si è appellato contro la decisione di *Physical Review Letters*.

A quel punto, però, è arrivato un colpo di fortuna imprevisto. *Science* lo ha contattato: aveva ricevuto un articolo di Pendry, Schurig e Smith su un mantello dell'invisibilità, e la strategia e la matematica

nei due articoli erano tanto simili che la rivista aveva optato per pubblicarli insieme. I due articoli sono comparsi uno accanto all'altro nel numero di maggio 2006 di *Science* (Figura 14.3)[8].
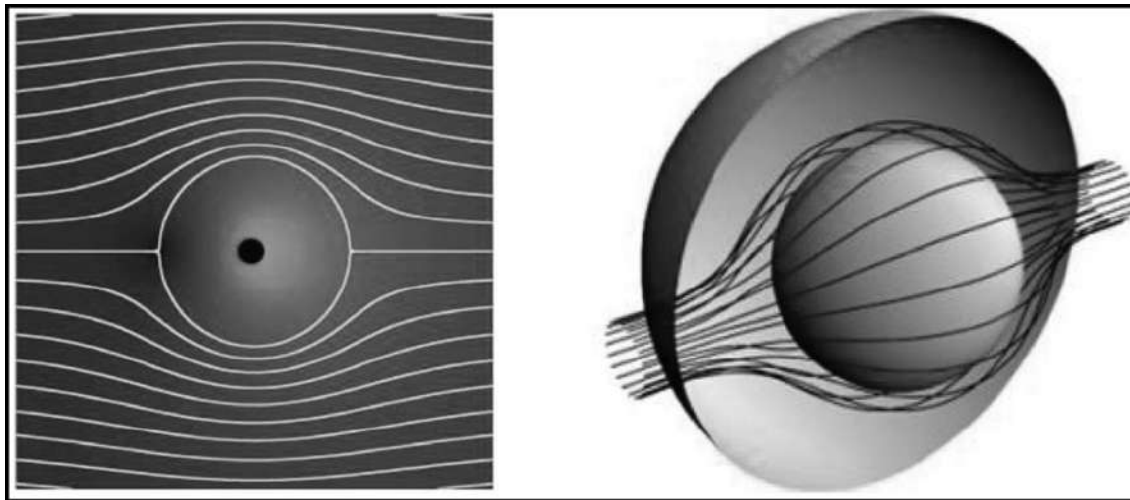
Figura 14.3 Il mantello di Leonhardt (a sinistra) e quello di Pendry, Schurig e Smith (a destra). Illustrazioni tratte da U. Leonhardt, "Optical Conformal Mapping", in "Science", 312, 2006, pp. 1777-1780 (a sinistra) e J.B. Pendry, D. Schurig, D.R. Smith, "Controlling Electromagnetic Fields", in "Science", 312, 2006, pp. 1780-1782 (a destra). Riprodotte con l'autorizzazione della American Association for the Advancement of Science, ottenuta attraverso il Copyright Clarance Center, Inc.

I due articoli hanno suscitato subito un grande scalpore a livello internazionale, e agli autori sono arrivate molte richieste di spiegare come funzionassero quei dispositivi e per che cosa potessero essere utilizzati. Entrambi i team, quello di Leonhardt e quello di Pendry, utilizzavano la medesima analogia per spiegare il funzionamento dei loro mantelli: "Dicono che sia possibile guidare la luce intorno al foro, un po' come l'acqua che scorre intorno a una roccia che affiora in un fiume, in modo che l'oggetto al suo interno non possa essere visto"[9]. Curiosamente, questa spiegazione era stata anticipata decenni prima da un autore di fantascienza. Si firmava A. Merritt, all'anagrafe Abraham Grace Merritt (1884-1943), e ha scritto molti romanzi classici di fantascienza e fantasy; anche se oggi è in gran parte dimenticato, ai

suoi tempi aveva avuto grande successo. Nel suo romanzo *The Face in the Abyss* (1931; *Il volto nell'abisso*, nell'edizione italiana), Graydon, un americano alla ricerca di un tesoro inca in Sudamerica, scopre invece una civiltà perduta e una divinità malvagia imprigionata in un gigantesco volto di pietra. Incontra anche i servitori del Serpente Madre, serpenti alati che possono comparire e scomparire a piacere. Razionalizza la loro apparente abilità sovrannaturale in questo modo:

> I serpenti alati… i Messaggeri? In quanto a questo, era su una solida base scientifica. Ambrose Bierce aveva dedotto, nel suo racconto *The Damned Thing*, che cose simili potessero esistere; H.G. Wells aveva sfruttato la stessa idea nella sua opera *The Invisible Man*: e anche Maupassant ne aveva parlato, poco prima di impazzire, nell'ossessionante racconto *L'Horla*. La scienza sapeva che era una cosa possibile, e gli scienziati di tutto il mondo cercavano di scoprirne il segreto per sfruttarlo nella prossima guerra. Sì, era facile spiegare i Messaggeri invisibili. Bastava concepire qualcosa che non assorbisse la luce e non la riflettesse. In tal caso i raggi luminosi li investirebbero come l'acqua di un torrente scorre sopra un macignoo immerso. Il macigno non è visibile. E non lo sarebbe neppure la cosa su cui scorressero i raggi luminosi. I raggi si incurverebbero intorno ad essa, portando agli occhi dell'osservatore l'immagine di quello che sta dietro. L'oggetto in mezzo sarebbe invisibile: non potrebbe non esserlo, se non assorbisse e non riflettesse la luce.[10]

Sviluppando esplicitamente le idee di Ambrose Bierce, H.G. Wells e Guy de Maupassant. A. Merritt è riuscito a dedurre accuratamente come potesse funzionare la vera invisibilità, perlomeno attraverso un'analogia.

Altri autori di fantascienza hanno utilizzato spiegazioni simili per l'invisibilità. Quella forse più accurata dal punto di vista tecnico è comparsa nel racconto *For Love* di Algis Budrys del 1962, in cui l'umanità costruisce un vettore di armi invisibile per sganciare una bomba a fusione su una nave aliena ostile che si è installata sulla Terra. Il mezzo aereo utilizza una rete di cavi a fibra ottica (una struttura materiale) per guidare la luce attorno a sé.

Quando ho letto per la prima volta i nuovi articoli sull'invisibilità di Leonhardt e Pendry e colleghi, sono tornato subito alla domanda:

perché non è impossibile? Una decina di anni prima Wolf, Habashy e Nachman hanno presentato risultati in base ai quali si poteva immaginare che la vera invisibilità non si potesse raggiungere.

I due gruppi di ricerca avevano risposte diverse a quell'interrogativo. Ho saputo quale fosse la risposta di Ulf Leonhardt quando l'ho incontrato nel 2003 al convegno a Kiev. Quando ho detto: "L'invisibilità perfetta è impossibile", mi ha risposto, sostanzialmente: "Perché deve essere perfetta?". Per esempio, essere invisibili all'80 o al 90 percento potrebbe essere comunque un vantaggio incredibile. Nel film *Predator* (1987), l'omonimo essere, dotato di un "mantello" imperfetto, può ancora essere individuato quando è in movimento, ma è in grado di annientare tutto il team di commandos d'élite di Arnold Schwarzenegger, tranne Schwarzenegger stesso. Nel suo progetto, Leonhardt usava una versione semplice dell'ottica di trasformazione il cui risultato era un mantello non perfetto ma in linea di principio molto più facile da realizzare di quello di Pendry, Schurig e Smith[11].

Il progetto di questi ultimi, invece, utilizza una versione esatta dell'ottica di trasformazione, perciò è in linea di principio "perfetto", ma non è in conflitto con le dimostrazioni di Wolf, Habashy e Nachman, perché questi hanno dimostrato che l'invisibilità è impossibile per materiali normali, mentre il mantello di Pendry, Schurig e Smith utilizza metamateriali che non si trovano in natura.

In particolare, le dimostrazioni di Wolf, Habashy e Nachman valgono solo per materiali non magnetici; il progetto di Pendry, Schurig e Smith, invece, richiede che il materiale del mantello abbia una risposta magnetica. Inoltre, deve essere fatto di un materiale birifrangente, come la calcite ottica utilizzata da Thomas Young per sostenere la natura trasversale delle onde di luce circa duecento anni fa. Le dimostrazioni di Wolf, Habashy e Nachman non valgono per materiali anisotropi come la calcite.

Va notato che la fisica del mantello dell’invisibilità può essere spiegata anche mediante l’interferenza distruttiva completa, come sono stati spiegati in precedenza le sorgenti non radianti e i non-scattering scatterer. In un mantello dell’invisibilità, il campo diffuso non sfugge mai dalla regione del mantello, a causa dell’interferenza distruttiva: possiamo immaginare che i campi diffusi prodotti dalle componenti elettriche e magnetiche del mantello finiscano per cancellarsi completamente a vicenda. Una delle molte cose emerse dagli articoli sul mantello dell’invisibilità, comunque, è stato il riconoscimento del fatto che l’ottica di trasformazione è una tecnica molto migliore per progettare oggetti invisibili.

Nel novembre 2006, solo sei mesi dopo la pubblicazione degli articoli teorici, David Smith e i suoi collaboratori alla Duke University hanno realizzato il primo prototipo grezzo di un mantello dell’invisibilità[12]. Come i loro precedenti materiali, che dimostravano un indice di rifrazione negativo, il loro mantello funzionava per lunghezze d’onda nel dominio delle microonde ed era un mantello piatto racchiuso fra due piastre di metallo (Figura 14.4). Questo mantello sperimentale era basato su un progetto semplificato, era più facile da produrre e non permetteva un’invisibilità “perfetta”; dimostrava però che la luce può essere guidata intorno alla regione centrale protetta dal mantello, come previsto dalla teoria.
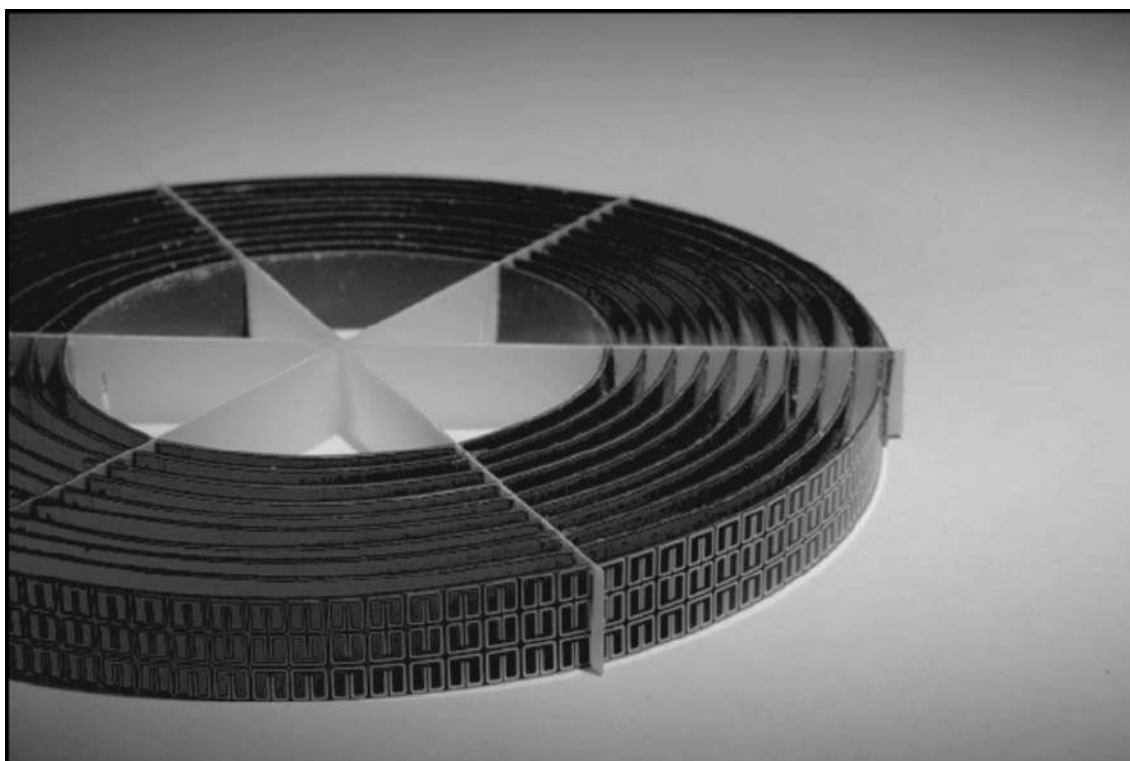
Figura 14.4 Il primo mantello sperimentale a microonde. Fotografia per gentile concessione del Professor David R. Smith.

Nel 2006, quindi, i metamateriali e i mantelli dell'invisibilità erano entrati a pieno nella consapevolezza del pubblico e della comunità scientifica. Tutti si ponevano due grandi domande. Come si può realizzare un mantello dell'invisibilità per la luce visibile, per avere, cioè, un oggetto veramente invisibile? E per che cosa potrebbero essere usati questi strumenti di invisibilità? A quel tempo, sembrava che quasi tutto fosse possibile. David Schurig, per esempio, suggeriva: "Potreste voler mettere un mantello sulla raffineria che vi blocca la vista della baia", lo stesso tipo di applicazione che Henry Slesar aveva immaginato nel 1958 per il sulfaborgonio, la sua vernice dell'invisibilità, nel racconto "Il caso dell'assassino invisibile"[13]. Il decennio successivo avrebbe offerto molti tentativi di dare una risposta

a entrambe le domande, e le risposte spesso sarebbero state sorprendenti.

---

1 Pendry e Ramakrishna, “Near-Field Lenses in Two Dimensions”; Pendry, “Perfect Cylindrical Lenses”.

2 Ward e Pendry, “Refraction and Geometry in Maxwell’s Equations”.

3 Ball, “Bending the Laws of Optics with Metamaterials”, p. 201.

4 Leonhardt e Piwnicki, “Optics of Nonuniformly Moving Media”.

5 Leonhardt, corrispondenza privata.

6 Leonhardt, corrispondenza privata.

7 Petit, “Invisibility Uncloaked”.

8 Leonhardt, “Optical Conformal Mapping”; Pendry et al., “Controlling Electromagnetic Fields”.

9 Ball, “Invisibility Cloaks Are in Sight”.

10 Merritt, *Face in the Abyss* [trad. it. pp. 82-83].

11 Ulf Leonhardt è stato estremamente attivo nelle ricerche sull’invisibilità e nell’ottica di trasformazione, dopo il 2006; ha scritto fra l’altro un romanzo sull’invisibilità, *Mission Invisible* (2020).

12 Schurig et al., “Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies”.

13 Boyle, “Here’s How to Make an Invisibility Cloak”.

Capitolo 15

Le cose si fanno bizzarre

> Il baule, aperto, rivelò uno spazio di sessanta per novanta per quarantacinque centimetri. All'interno, allineati ordinatamente lungo un fianco, c'erano venti piccoli accumulatori, con annessi dei cavi flessibili arrotolati, e venti caschi, dotati di visori curiosamente complessi. Per il resto, il baule era praticamente vuoto. La Decalon vi si avvicinò e con movimenti esperti passò alle compagne di squadra i visori e gli accumulatori. Poi raggiunse con maggiore attenzione l'interno del baule. E la mano scomparve. Gradualmente, pezzo per pezzo, la Decalon era svanita, finché ne rimasero soltanto i piedi, penzolanti fuori nel vuoto. Ma anch'essi svanirono nel momento in cui calzarono un paio di stivali invisibili.
>
> – Don A. Stuart, *Cloak of Aesir* (1939) [trad. it. p. 98]

I progetti di mantelli pubblicati nel 2006 erano degni di nota in quanto, in linea di principio, offrivano l'invisibilità "perfetta", come l'avevano sognata gli autori di fantascienza. Un mantello perfetto nasconderebbe qualsiasi oggetto che si trovi al suo interno, guiderebbe la luce perfettamente intorno alla regione centrale del mantello stesso e la luce guidata verrebbe rimandata sulla sua strada senza alcuna distorsione.

Gli articoli sui mantelli erano rivoluzionari, ma tutti si rendevano conto che quei primi progetti possedevano numerosi limiti significativi. Per esempio, quei mantelli avrebbero gettato almeno un'ombra leggera. Tutti i materiali, anche quelli altamente trasparenti, nel loro stato naturale assorbiranno luce in una certa misura. Al fondo di una piscina d'acqua profonda, per esempio, tutto appare blu perché la luce rossa è stata assorbita in modo preferenziale e nelle profondità dell'oceano l'oscurità è totale, perché tutta la luce è stata assorbita

durante la discesa dalla superficie. I mantelli descritti nel 2006 sono dispositivi ottici passivi: guidano la luce intorno alla regione nascosta senza aggiungere energia al sistema; perciò un po' di quella luce, mentre viene guidata, verrà inevitabilmente assorbita. Questi mantelli passivi getteranno almeno un'ombra leggera, come il personaggio del racconto *L'ombra e il baleno* di Jack London, il che li rende in linea di principio individuabili.

Questi mantelli devono anche presentare variazioni estreme dell'indice di rifrazione, in tutto il loro volume, per nascondere la regione al loro interno, e devono avere anche un'estrema anisotropia. Queste variazioni estreme sono difficili da realizzare e contribuiscono ulteriormente al problema, già difficile e ancora irrisolto, di produrre metamateriali per la luce visibile.

Una terza difficoltà di quei mantelli: se dovessero effettivamente funzionare alla perfezione, nessuno potrebbe vedere il mantello, ma chiunque sia nascosto sotto di esso sarebbe a sua volta impossibilitato a vedere alcunché! In linea di principio il mantello impedisce a tutta la luce di entrare nella regione nascosta, il che lo rende una soluzione tutt'altro che ideale per lo spionaggio. Gli autori di fantascienza ne erano certamente consapevoli. Ne *Il mantello di Aesir* di John W. Campbell, i Sarn, alieni che hanno conquistato l'umanità, incontrano l'opposizione di un essere dotato di superpoteri, Aesir, con un mantello invulnerabile di oscurità. Nel tentativo di intrappolarlo, i Sarn mettono in campo i loro preziosi mantelli dell'invisibilità, a cui sono abbinati visori che consentono a chi indossa il mantello di vedere la luce ultravioletta. I mantelli provocano la deflessione della luce visibile, mentre la luce ultravioletta vi passa attraverso e può essere percepita, consentendo così a chi li indossa di poter vedere. Per rendere utilizzabile nella pratica l'invisibilità, dovrebbe essere incluso un

meccanismo che consenta all’oggetto rivestito del mantello di percepire il mondo esterno.

Quella che è forse la difficoltà più grande dei mantelli iniziali è legata alla velocità della luce. Un raggio di luce che passi vicino all’interno del mantello deve aggirare la regione nascosta, percorrendo una distanza maggiore rispetto a uno dei raggi paralleli che si propaghino all’esterno del mantello. Perché il mantello sia realmente non individuabile, quei raggi devono percorrere le diverse distanze nello stesso tempo: altrimenti si potrebbe individuare la presenza del mantello calcolando il tempo necessario alla luce per attraversare la regione. La luce che viene dirottata intorno al mantello perciò deve viaggiare a una velocità superiore rispetto a quella della luce nell’aria (Figura 15.1). La velocità della luce nell’aria, però, è pressoché identica alla velocità della luce nel vuoto, che è la velocità limite dell’universo: nulla può viaggiare a una velocità superiore a quella della luce nel vuoto, come ha previsto per primo Albert Einstein con la sua teoria ristretta della relatività del 1905.
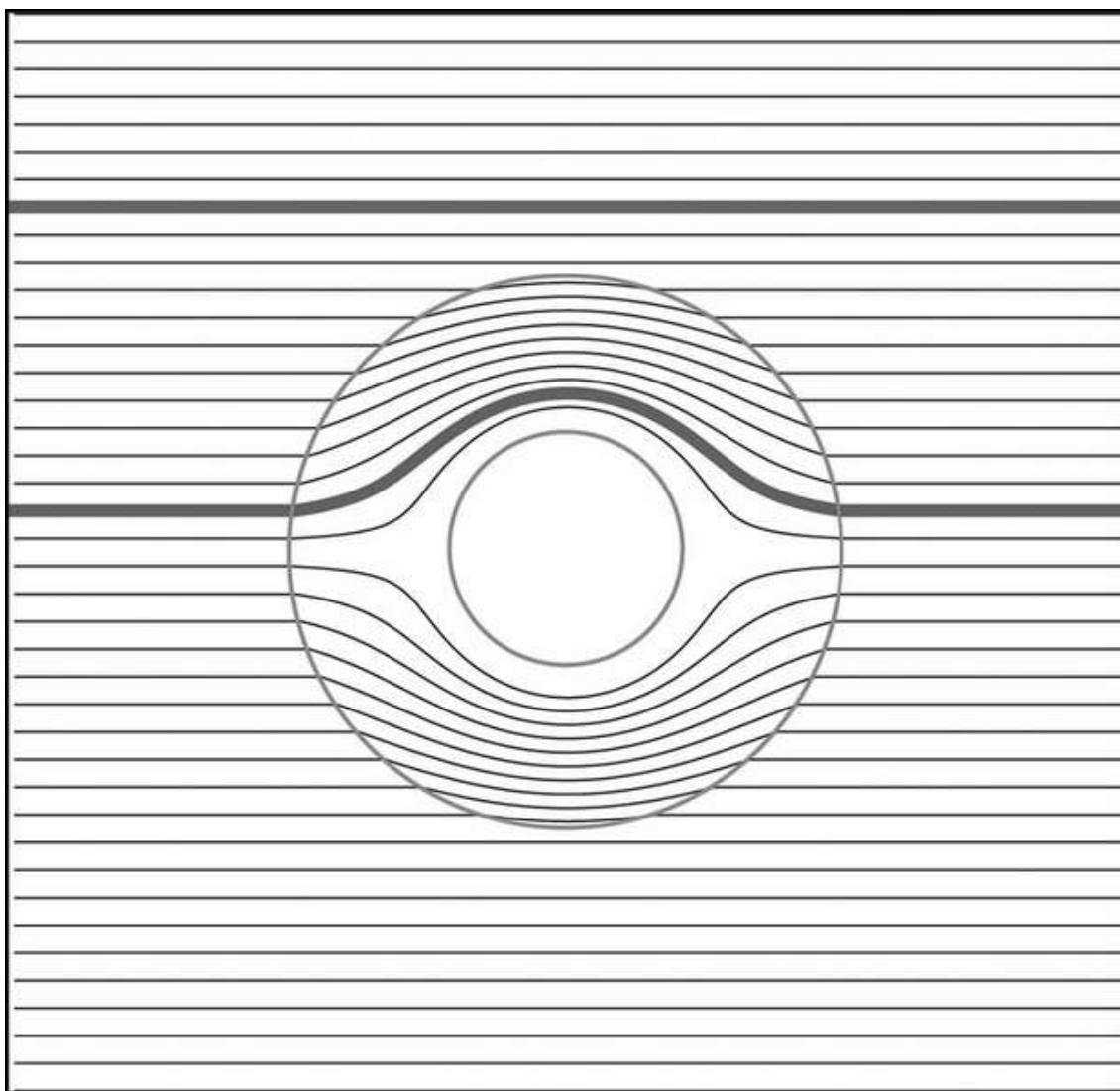
Figura 15.1 Il limite relativistico dei dispositivi per l’invisibilità. Un raggio che passi vicino al centro deve percorrere una distanza maggiore rispetto a un raggio che si propaga all’esterno del mantello.

Per la luce che viaggia nella materia, esiste una piccola scappatoia: per una singola lunghezza d’onda, o per un ristretto intervallo di lunghezze d’onda, la velocità della luce nella materia può essere superiore a quella della luce nel vuoto senza violare la relatività di Einstein, ma è stato dimostrato che l’intervallo di lunghezze d’onda diminuisce con l’aumentare delle dimensioni del mantello. Al di fuori di questo intervallo di lunghezze d’onda si presenta un problema

ulteriore: altre ricerche hanno dimostrato che i mantelli disperderanno maggiormente la luce per lunghezze d'onda esterne all'intervallo di invisibilità. In sostanza, qualsiasi dispositivo più grande di una particella microscopica potrebbe essere reso invisibile per una sfumatura molto specifica di rosso e di blu, ma sarebbe perfettamente visibile, o addirittura ancora più visibile, per qualsiasi altro colore[1].

A causa di questi limiti, dopo il 2006 molte ricerche sull'invisibilità si sono concentrate sulla progettazione di mantelli meno che perfetti, ma che non soffrano di tutte le limitazioni delle versioni originali. Uno di questi progetti è stato presentato nel 2008 da Jensen Li e John Pendry, e il nuovo approccio è stato definito "nascondere sotto il tappeto"[2]. Nel mantello originale, veniva utilizzata l'ottica di trasformazione per stirare matematicamente un punto nello spazio e trasformarlo in una cavità tridimensionale, attorno alla quale la luce potesse fluire. In un mantello "a tappeto", l'ottica di trasformazione viene utilizzata invece per stirare verso l'alto una superficie bidimensionale. Se il mantello e l'oggetto che riveste sono collocati su una superficie piana riflettente, la luce verrà reindirizzata come se fosse riflessa dalla superficie piana, nascondendo l'oggetto (Figura 15. 2). La regione rivestita dal mantello appare come il rigonfiamento prodotto da qualcosa di nascosto sotto un tappeto, dal che il nome di "mantello a tappeto".
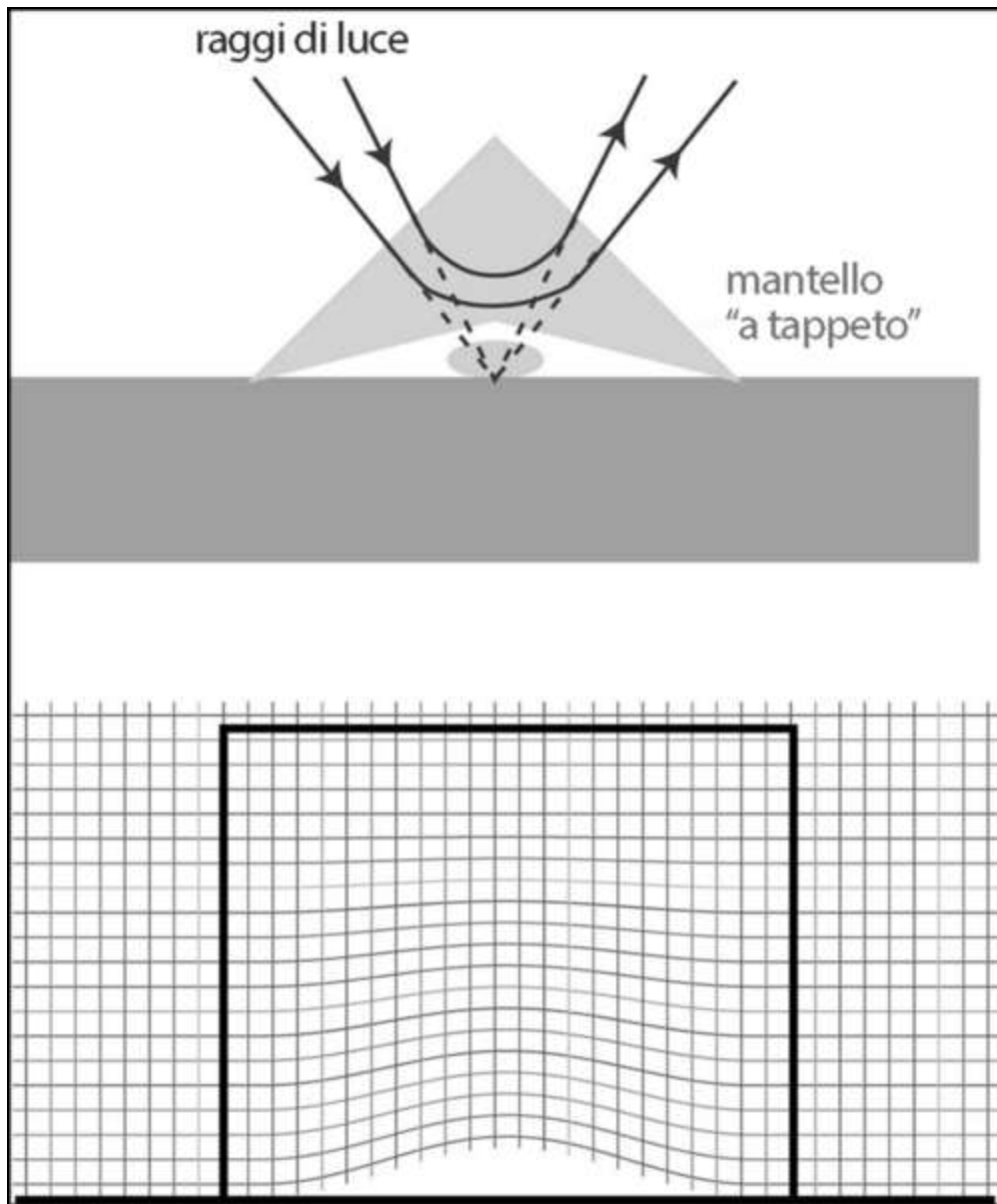
Figura 15.2 Un mantello “a tappeto”. Sopra: i raggi vengono piegati come se fossero riflessi direttamente da una superficie piana. Sotto: la trasformazione geometrica che realizza il mantello a tappeto.

I mantelli a tappeto sono un buon esempio dei compromessi a cui scendono i ricercatori per poter realizzare l’invisibilità nella pratica. Non sono mantelli perfetti, nel senso che possono nascondere solo qualcosa che si trovi su una superficie riflettente piana. Tuttavia, poiché non devono nascondere l’oggetto da tutte le direzioni,

richiedono cambiamenti meno estremi dell'indice di rifrazione e una minore anisotropia rispetto ai progetti iniziali di mantelli, il che li rende, almeno in linea di principio, più facili da costruire. Poiché i cambiamenti nell'indice di rifrazione sono meno estremi, i dispositivi sono anche in grado di funzionare con un intervallo maggiore di lunghezze d'onda.

I ricercatori sono passati rapidamente a costruire prototipi di mantelli a tappeto: i primi sono stati realizzati dal gruppo di David Smith alla Duke University, progettati per microonde con una lunghezza d'onda di circa 2 millimetri[3]. La regione rivestita dal mantello era una cunetta curva larga circa 100 millimetri e alta 10. Non molto dopo, ricercatori dell'Università della California a Berkeley hanno costruito un mantello a tappeto in grado di funzionare per lunghezze d'onda più vicine alla luce visibile, intorno ai 1.400 nanometri[4]. La cunetta rivestita dal loro dispositivo era di circa 4000 nanometri di larghezza e 400 di altezza: un buon inizio, ma chiaramente non si trattava di misure sufficienti per nascondere una persona. Nel 2010, John Pendry ha collaborato con ricercatori di Karlsruhe, in Germania, e ha prodotto un dispositivo che funzionava per un intervallo di lunghezze d'onda intorno ai 1.400 nanometri, con una cunetta alta circa 1.000 nanometri[5].

Ma che cosa si può dire della possibilità di nascondere oggetti più grandi? Qui, la natura ha fornito un aiuto inaspettato. La calcite ottica (lo stesso cristallo anisotropo che ha portato Thomas Young a concludere correttamente che la luce è un'onda trasversale) ha le proprietà di anisotropia giuste per poter essere utilizzata nella costruzione di un rozzo mantello a tappeto. In effetti, un mantello a tappeto può essere realizzato con due soli pezzi di calcite, opportunamente tagliati e incollati fra loro. I mantelli creati con la calcite sono tutt'altro che ideali (nascondono gli oggetti solamente da

angoli di vista molto specifici e i mantelli stessi non sono invisibili), ma si possono creare con relativa facilità e a basso costo, perfino per grandi dimensioni.

Sembra che a questa idea siano arrivati indipendentemente, e quasi contemporaneamente, due diversi gruppi di ricerca. Nel gennaio 2011, un gruppo diretto da Baile Zhang e George Barbastathis, nell'ambito di una collaborazione fra Singapore e MIT, ha pubblicato l'articolo "Macroscopic Invisibility Cloak for Visible Light" sulla rivista *Phisical Review Letters*[6]. Questi ricercatori hanno costruito un mantello a tappeto con due pezzi di calcite in grado di nascondere una regione alta 2 millimetri. Rispetto alle dimensioni di un essere umano, sembra ancora estremamente piccola, ma è stata sufficiente per vedere l'effetto a occhio nudo. Questo mantello a tappeto, inoltre, funzionava bene per tutti i colori della luce visibile, avvicinandolo alla "vera" invisibilità più di quanto fosse mai stato fatto. Solo un mese dopo, ricercatori del Regno Unito e della Danimarca, in collaborazione con John Pendry, hanno presentato un mantello a tappeto simile, basato sulla calcite: anche la loro regione rivestita dal mantello aveva un'altezza di circa 1 millimetro[7].

La pubblicazione quasi simultanea di due articoli molto simili ma indipendenti sui mantelli dell'invisibilità ha ricordato molto la pubblicazione congiunta degli articoli iniziali del 2006, ed entrambi i casi illustrano come spesso le idee in campo scientifico vengano scoperte in modo indipendente quando i tempi sono maturi. Un esempio famoso è quello della disputa fra Isaac Newton e Gottfried Wilhelm Leibniz nel 1711: ciascuno dei due aveva sviluppato quello che oggi chiamiamo calcolo infinitesimale, ma si erano scontrati pubblicamente sul primato della scoperta. I sostenitori di Newton arrivarono al punto da accusare Leibniz di avere plagiato le idee di Newton, ma gli storici moderni concordano che i due scienziati hanno

scoperto il calcolo in modo indipendente. Analogamente, i primi mantelli a tappeto di calcite sono stati creati in modo indipendente: le conoscenze giuste erano a disposizione di tutti. I due gruppi di ricerca in questione, comunque, non si sono messi a litigare come Newton e Leibniz.

Baile Zhang, che ora lavora alla Nanyang Technological University di Singapore, ha continuato a utilizzare la calcite per creare versioni più grandi dei mantelli a tappeto. Nel 2013 ha lasciato a bocca aperta il pubblico della TED Conference di Long Beach, in California, con un mantello più grande, in grado di nascondere un Post-It di colore rosa brillante. Quando gli è stato chiesto quali fossero i suoi programmi per il futuro, ha detto che conta di rendere il mantello più grande: “Il più grande possibile”[8].

Zhang non parlava a vanvera. Quello stesso anno, insieme con colleghi cinesi, ha presentato una versione modificata di un mantello dell’invisibilità in calcite che piega la luce intorno ai lati di un oggetto, anziché sopra di esso[9]. Zhang e colleghi hanno realizzato un dispositivo grande abbastanza da nascondere un pesciolino rosso in un acquario e perfino un gatto nell’aria (Figura 15.3).

Il mantello originale e quello a tappeto erano stati progettati entrambi in modo che la luce attraversasse l’interno in un tempo uguale a quello impiegato passando all’esterno. Il nuovo “mantello a raggio” di Zhang abbandonava questo requisito, e in questo modo risultava possibile costruire un dispositivo di dimensioni maggiori, in grado di funzionare per un intervallo più ampio di lunghezze d’onda.
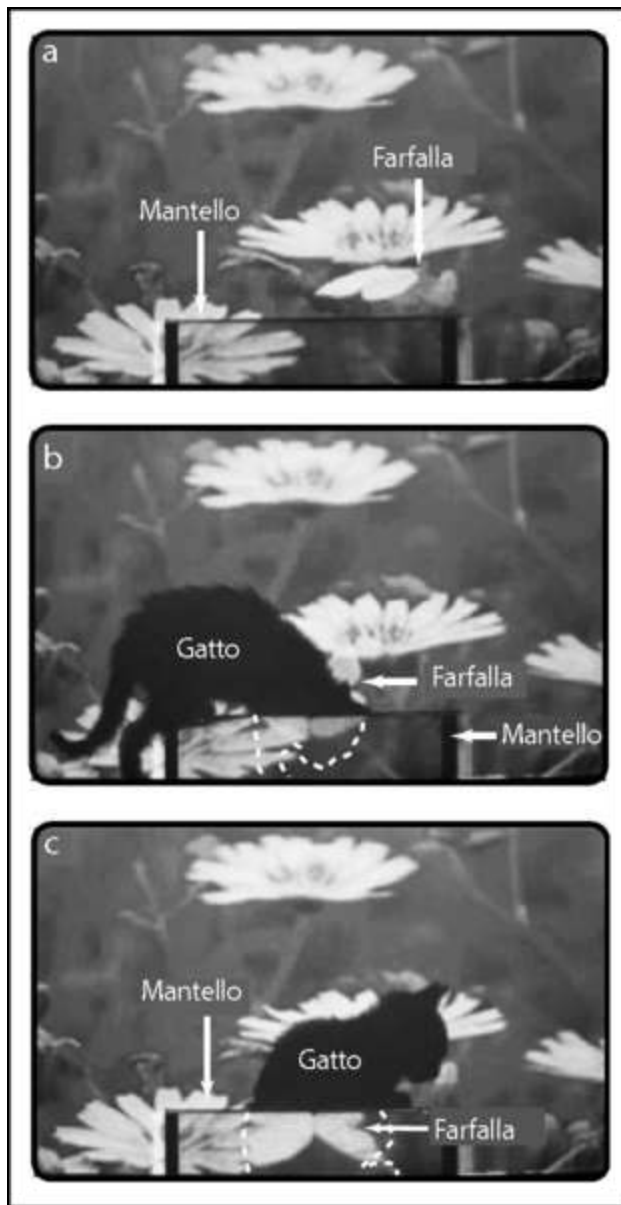
Figura 15.3 Un mantello che nasconde un gatto. Illustrazione tratta da H. Chen, B. Zheng, L. Shen, H. Wang, Xi. Zhang, N.I. Zheludev e B. Zhang, "Ray-Optics Cloaking Devices for Large Objects in Incoherent Natural Light", in "Nature Communications", 4, 2013, p. 2652. Licensed under CC BY-NC-SA 3.0.

D'altra parte, quando la luce si propaga dopo avere attraversato il mantello, l'immagine sarà distorta da questo ritardo temporale, e il mantello sarà visibile. L'invisibilità perfetta però non era l'obiettivo del team di Zhang; hanno immaginato che il mantello potesse avere

applicazioni nel campo della sicurezza e della sorveglianza: “si può immaginare di nascondere un osservatore in una cabina di vetro che sembri vuota”[10]. Poiché un mantello a raggio non è invisibile da tutte le possibili direzioni di osservazione, i ricercatori hanno anche suggerito la possibilità di migliorarlo aggiungendo un componente attivo: si potrebbero progettare versioni del dispositivo per tracciare la posizione degli osservatori e orientare continuamente il lato invisibile verso di essi.

I mantelli dell’invisibilità ormai attirano l’attenzione sia della comunità scientifica che del pubblico in generale, e molti ricercatori hanno iniziato a esplorare altri modi per rendere invisibile un oggetto, anche rivisitando idee precedenti. Nel 2005, ancora prima che venissero pubblicati i famosi articoli sull’invisibilità, Andrea Alù e Nader Engheta dell’Università della Pennsylvania stavano considerando la possibilità di rendere invisibili oggetti sferici applicando un sottile rivestimento di metamateriale alla loro superficie[11]. La loro impostazione, con l’uso di una struttura a più strati per ridurre la luce diffusa da un oggetto, è simile agli “oggetti invisibili” microscopici proposti da Milton Kerker nel 1969. Alù ed Engheta hanno generalizzato il lavoro di Kerker, prendendo in considerazione come un rivestimento di metamateriale possa rendere invisibili oggetti molto più grandi.

L’invisibilità, nella versione di Alù ed Engheta, ha un vantaggio importante rispetto ai progetti del 2006, come i due autori hanno evidenziato in un articolo intitolato “Cloaking a Sensor” (2009[12]. La loro struttura non impedisce alla luce di entrare nella regione centrale, ma usa l’interferenza distruttiva per evitare che la luce eventualmente diffusa esca dalla regione. Se si colloca un sensore al centro della struttura, e la struttura è progettata specificamente per bloccare la luce diffusa dal sensore, il sensore può ricevere informazioni ma rimanere

in gran parte non rilevabile. Quindi il sensore sotto il mantello potenzialmente risolve il problema di “come fa l’uomo invisibile a vedere?”.

Il lavoro di Alù ed Engheta ha mostrato che esistono vantaggi nel realizzare un mantello su misura per nascondere un oggetto specifico. Un altro vantaggio sorprendente, dimostrato a livello teorico da ricercatori di Hong Kong, è che è possibile creare un dispositivo dell’invisibilità che non circondi effettivamente l’oggetto da nascondere[13]. In un caso del genere il mantello è progettato per essere collocato accanto all’oggetto da nascondere e comprende, nella sua struttura, un “anti-oggetto” che cancella tutta la luce diffusa dall’oggetto. È un po’ come immaginare un mantello magico dell’invisibilità che continui a nasconderti anche quando lo appoggi a un appendiabiti.

La presentazione dei primi mantelli dell’invisibilità avrebbe portato a possibilità ancor più fuori dal comune. Come abbiamo visto, l’esistenza di oggetti invisibili fa pensare che il problema inverso dello scattering non abbia una soluzione univoca, cioè che in generale non sia possibile determinare la struttura di un oggetto a partire dalle misurazioni del campo diffuso. Questo a sua volta fa pensare che si possano usare metamateriali per costruire un oggetto che abbia l’aspetto di un altro oggetto: la semplice esistenza di mantelli dell’invisibilità indica che è possibile creare illusioni tridimensionali perfette. In base alle mie ricerche sui problemi inversi, mi sono reso conto di questa possibilità nel momento in cui sono stati pubblicati gli articoli del 2006, ma non ho avuto mai l’occasione di approfondire l’idea (è uno dei miei grandi rimpianti in campo scientifico!). Nel 2009, gli stessi ricercatori di Hong Kong che avevano dimostrato i mantelli esterni hanno eseguito le prime simulazioni da cui emerge la possibilità di quella che chiamano “ottica delle illusioni”[14].

La loro prima dimostrazione creava l’illusione di un cucchiaio che diventava una tazza (Figura 15.4). L’immagine a sinistra nella figura mostra le onde, che provengono da sinistra, diffuse da un cucchiaio, quella a destra mostra le onde diffuse da una tazza. L’immagine centrale mostra un dispositivo di illusione, collocato sopra il cucchiaio, che fa in modo che l’onda di luce diffusa totale presenti l’aspetto di una tazza. Il dispositivo di illusione contiene sia l’immagine della tazza sia l’anti-immagine del cucchiaio, che cancella la diffusione da parte del cucchiaio.
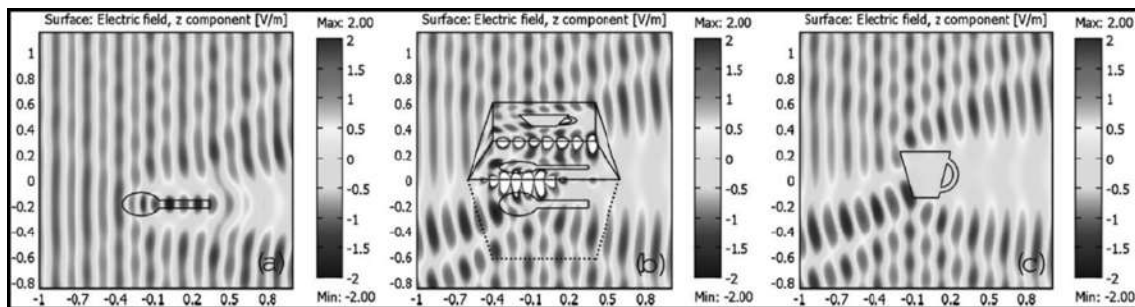
Figura 15.4 Simulazione che mostra la creazione di un’illusione: un cucchiaio appare come una tazza. Illustrazione riprodotta con autorizzazione da Y. Lai, J. Ng, H.Y.Chen, D.Z. Han, J.J. Xiao, Z.-Q. Zhang, C-T. Chang, “Illusion Optics: The Optical Transformation of an Object into Another Object”, in “Physical Review Letters”, 102, 2009, p. 253902. Copyright 2009 by American Physical Society.

I ricercatori avevano in serbo una dimostrazione ancora più sorprendente. Poiché il dispositivo di illusione può trovarsi vicino all’oggetto che trasforma, senza circondarlo, è possibile creare un dispositivo di illusione che, quando collocato accanto a una parete continua, produca l’illusione di un foro nella parete, consentendo alla luce di attraversarla liberamente.

Qualcuno forse si sarà già preoccupato della possibilità che altri possano spiarlo direttamente attraverso le pareti, ma è una preoccupazione prematura. I dispositivi di illusione, come i mantelli originali, funzionano solo per un intervallo molto piccolo di lunghezze

d’onda, il che significa che la parete può essere attraversata solo da una sfumatura molto specifica di rosso e da niente altro. Inoltre, la simulazione utilizzava una parete con uno spessore pari a circa una lunghezza d’onda; dato che la lunghezza d’onda della luce visibile è nell’ordine del milionesimo di metro, se la vostra casa avesse pareti tanto sottili un dispositivo di illusione sarebbe l’ultimo dei vostri problemi.

Se è possibile creare l’illusione di un foro in una parete, è possibile fare anche il contrario e creare l’illusione di una parete in un foro? Sempre nel 2009, un gruppo di ricercatori, in collaborazione fra Shanghai e Hong Kong, ha dimostrato che in linea di principio è possibile[15]. Il loro articolo ha introdotto il concetto di “superscatterer”, un oggetto illusorio che appare molto più grande di quanto sia in realtà. Si potrebbe quindi collocare un piccolo superscatterer all’interno di una apertura di grandi dimensioni, creando quella che sembrerebbe una parete senza soluzione di continuità: a tutti gli effetti, una porta segreta ottica.

Si possono inventare altri strani dispositivi esplorando ulteriormente l’analogia fra ottica di trasformazione e curvatura dello spazio nella teoria generale della relatività di Einstein. Per esempio, nella teoria di Einstein si ipotizza che spazio e tempo possano essere configurati in *wormhole* (ponti di Einstein-Rose, più familiarmente cunicoli spazio-temporali) che mettono in comunicazione regioni di spazio-tempo fra loro distanti. (Il termine inglese *wormhole* deriva dall’analogia del foro [*hole*] che un verme [*worm*] scava in una mela, creando una scorciatoia da una parte della mela all’altra.) Nel 2007, Allan Greenleaf, Yaroslav Kurylev, Matti Lassas e Gunther Uhlmann hanno dimostrato a livello teorico la possibilità di creare cunicoli ottici mediante l’ottica di trasformazione[16]. Questi cunicoli ottici non sono veri tunnel nello spazio come nella relatività generale, bensì passaggi

che consentono la propagazione della luce lasciando invisibile il resto della struttura.

Greenleaf, Lassas e Uhlmann erano ben preparati a lasciare un segno nella fisica dell'invisibilità. Nel 2003, vari anni prima della pubblicazione dei fondamentali articoli sui mantelli, i tre avevano pubblicato un articolo in cui si dimostrava che i materiali anisotropi rendono non univoca la soluzione per una certa classe di problemi inversi e aprono potenzialmente la strada a oggetti invisibili[17]. Il loro lavoro indica l'esistenza di una possibile lacuna nelle dimostrazioni di non esistenza di Nachman, Habashy e Wolf, anche se sarebbe stata riconosciuta solo a posteriori.

Anche se un cunicolo ottico sembra un sogno fantascientifico del futuro lontano, almeno in un senso limitato i principi sono stati già dimostrati. Nel 2015, ricercatori della Universitat Autònoma de Barcelona in Spagna hanno costruito un dispositivo che si comporta come un cunicolo per campi magnetici statici, come quelli prodotti da un magnete a barra[18]. Se si colloca nel dispositivo il polo nord di un magnete a barra, il dispositivo a tutti gli effetti "stira" il magnete, facendo sì che il polo nord sembri emergere dal lato distale della struttura. Per ottenere questo effetto, il dispositivo utilizza una combinazione di metamateriali magnetici e superconduttori.

La creazione di metamateriali "stira-magneti" ha una conseguenza interessante, legata alla fisica fondamentale. Tutti i magneti noti in natura hanno un polo nord e un polo sud: non si sono mai incontrati poli nord o poli sud isolati. Se si spezza in due un magnete a barra pensando di separare i due poli, si ottengono invece due magneti a barra, ciascuno con un proprio polo sud e un proprio polo nord[19]. Nel 1931, il famoso fisico quantistico P.A.M. Dirac si era chiesto, sul piano teorico: che cosa succederebbe, se esistesse un polo magnetico isolato, un monopolo?[20] Utilizzando una combinazione di equazioni di

Maxwell e fisica quantistica, Dirac ha dimostrato che la semplice esistenza di un singolo monopolo magnetico in tutto l'universo avrebbe comportato che tutte le cariche elettriche si dovessero presentare in quantità discrete, con la carica elettrica più piccola trasportata dall'elettrone. Questo ha condotto i ricercatori a sospettare che i monopoli magnetici debbano esistere, e sono state intraprese ampie ricerche sperimentali per individuarli[21].

Nei suoi calcoli, Dirac creava un monopolo "stirando" matematicamente un magnete a barra, lasciando un polo fisso e stirando l'altro a distanza infinita. Il cunicolo magnetico teorizzato da Greenleaf e collaboratori e costruito sperimentalmente dal gruppo di Barcellona fa sostanzialmente la stessa cosa: se si colloca nel cunicolo un magnete a barra, viene stirato (o vengono stirati i suoi campi) fino all'altra estremità del cunicolo. Questo non dimostra che in natura esistano veri monopoli, ma fa capire che l'idea di un monopolo non è così peregrina come potrebbe sembrare.

Vale la pena notare un altro risultato curioso, legato all'invisibilità. Nel 2008, scienziati di Shanghai e Hong Kong hanno dimostrato che è possibile creare un "anti-mantello"[22]. C.T. Chan e colleghi, mediante simulazioni, hanno mostrato che il loro anti-mantello, se collocato all'interno della regione nascosta di un dispositivo di invisibilità, avrebbe annullato gli effetti del mantello e reso visibile tutta la struttura. Questo risultato ha dimostrato che perfino un dispositivo di invisibilità "perfetta" ha dei limiti e, in circostanze inaspettate, il suo funzionamento può interrompersi.

Con il passare del tempo, lo scalpore iniziale intorno ai mantelli e all'invisibilità si è un po' attenuato. I ricercatori non hanno ancora un metodo per costruire i metamateriali tridimensionali necessari per realizzare gli strani dispositivi quasi fantascientifici citati in questo

capitolo. La maggior parte di quei dispositivi, inoltre, ha il limite di poter funzionare solo per un piccolo intervallo di lunghezze d'onda.

Quest'ultimo limite, però, potrebbe essere superato in futuro. Nel 2019, una ricerca condotta da un gruppo internazionale guidato dallo svizzero Hatis Altug ha pubblicato sulla prestigiosa rivista *Nature Communications* un saggio dal titolo provocatorio: "Ultrabroadband 3D Invisibility with Fast-Light Cloaks"[23]. La maggior parte dei dispositivi di cui abbiamo parlato in tutto il libro sono dispositivi *passivi*, che si limitano a guidare la luce intorno alla regione nascosta senza aggiungere energia all'onda di luce. Il mantello di Altug, invece, è un dispositivo *attivo*: gli atomi del mantello sono predisposti a immagazzinare energia e a cederla all'onda incidente al suo passaggio. Questo fa sì che l'onda di luce che viaggia attraverso il mantello appaia viaggiare a velocità superiore a quella della luce nel vuoto, ovviando ai limiti di lunghezza d'onda del mantello passivo. Con questo approccio attivo all'invisibilità, i ricercatori hanno simulato un mantello che funziona per tutto lo spettro visibile della luce.

Come è possibile che la luce che attraversa un mezzo attivo appaia muoversi a velocità superiore a quella della luce nel vuoto, senza violare la relatività di Einstein? Immaginiamo un autobus che trasporta al suo centro un gruppo di passeggeri. A ogni fermata, un nuovo passeggero sale dalla porta anteriore dell'autobus e uno dei passeggeri precedenti scende dalla porta posteriore. Se il nuovo passeggero rimane vicino alla parte anteriore dell'autobus, la massa dei passeggeri a tutti gli effetti si è spostata in avanti. Se calcolassimo il centro di massa dei passeggeri, scopriremmo che si muove a velocità leggermente superiore a quella dell'autobus stesso!

Analogamente, immaginiamo che il nostro autobus rappresenti un impulso di luce che attraversa il nostro mezzo attivo. Quando incontra degli atomi, assorbe un po' della loro energia (i passeggeri che entrano

dalla porta anteriore dell'autobus) e cede a sua volta un po' di energia agli atomi che ha già sfruttato (i passeggeri che escono dalla porta posteriore dell'autobus). Anche se l'impulso stesso (l'autobus) non viaggia a velocità superiore a quella precedente, l'energia nell'impulso si sposta in avanti, e così appare che si muova a velocità superiore a quella della luce nel vuoto.

Se per realizzarlo si scelgono i materiali appropriati, il mantello poi può funzionare per un intervallo di frequenze ampio. L'invisibilità non sarà ancora perfetta (poiché nulla può viaggiare a velocità superiore a quella della luce nel vuoto, un impulso molto breve mostrerà ancora un ritardo fra la luce che attraversa il mantello e quella che passa all'esterno) ma, in condizioni di vista normali sarà praticamente irrilevabile.

Non aspettatevi comunque di vedere presto in circolazione un mantello dell'invisibilità. Questo articolo riferiva solo di simulazioni, non di esperimenti, e le sfide da superare per realizzare effettivamente un mantello tridimensionale di metamateriale e di dimensioni concretamente utili rimangono enormi. Il lavoro di Altug e collaboratori mostra, però, che la fisica dell'invisibilità ha probabilmente in serbo ancora qualche sorpresa.

---

1 Hashemi et al., "Diameter-Bandwidth Product Limitation of Isolated- Object Cloaking".

2 Li e Pendry, "Hiding under the Carpet".

3 Li et al., "Broadband Ground-Plane Cloak".

4 Valentine et al., "Optical Cloak Made of Dielectrics".

5 Ergin et al., "Three-Dimensional Invisibility Cloak at Optical Wavelengths".

6 Zhang et al., "Macroscopic Invisibility Cloak for Visible Light".

7 Chen et al., "Macroscopic Invisibility Cloaking of Visible Light".

8 Sinclair, "Invisibility Cloak Demoed at TED2013".

9 Chen et al., "Ray-Optics Cloaking Devices for Large Objects".

10 Ball, "'Invisibility Cloak' Hides Cats and Fish".

11 Alù e Engheta, “Achieving Transparency with Plasmonic and Metamaterial Coatings”.

12 Alù e Engheta, “Cloaking a Sensor”.

13 Lai et al., “Complementary Media Invisibility Cloak”.

14 Lai et al., “Illusion Optics”.

15 Luo et al., “Conceal an Entrance by Means of Superscatterer”.

16 Greenleaf et al., “Electromagnetic Wormholes and Virtual Magnetic Monopoles”.

17 Greenleaf et al., “Anisotropic Conductivities $at Cannot Be Detected by EIT”.

18 Prat-Camps, Navau e Sanchez, “Magnetic Wormhole”.

19 Questa è una dimostrazione standard in fisica, e si possono acquistare nei negozi specializzati in materiale scientifico magneti a barra che si possono rompere facilmente per verificare che ciascun pezzo è dotato dei propri poli sud e nord.

20 Dirac, “Quantised Singularities in the Electromagnetic Field”.

21 Milton, “Theoretical and Experimental Status of Magnetic Monopoles”.

22 Chen et al., “Anti-Cloak”.

23 Tsakmakidis et al., “Ultrabroadband 3D invisibility with Fast-Light Cloaks”.

Capitolo 16

Più che nascondere

All'improvviso, nella sua posizione china, lo colse una sorta di vertigine, e la terra sembrava ondeggiare da impazzire sotto i suoi piedi. Barcollò, perse l'equilibrio e cadde dal bordo.

Semisvenuto, chiuse gli occhi per non vedere la discesa rovinosa e lo schianto sei metri sotto. Subito, sembrava che avesse raggiunto il fondo. Stupito e senza capire, scoprì che era disteso completamente, prono a mezz'aria, tenuto sospeso da una sostanza dura, piatta e invisibile. Le sue mani aperte incontravano un'ostruzione, fredda come il ghiaccio e liscia come marmo; e il gelo penetrava attraverso i suoi vestiti mentre giaceva e guardava giù nell'abisso. Strappatogli dalle mani dalla caduta, il suo fucile era sospeso accanto a lui.

Udì il grido spaventato di Langley, poi si rese conto che lo aveva afferrato per le caviglie e lo stava tirando fuori dal precipizio. Sentì la superficie invisibile che scivolava sotto di lui, piatta come un marciapiede d'asfalto, liscia come vetro. Poi Langley lo aiutava a rimettersi in piedi. Entrambi, in quel momento, avevano dimenticato la loro incomprensione.

"Sono pazzo?", urlò Langley. "Pensavo che fossi ormai spacciato, quando sei caduto. In che cosa ti sei impigliato, comunque?"

"Impigliato va bene", disse Furnham sovrappensiero mentre cercava di rimettersi in sesto. "Quella conca è rivestita di qualcosa di solido, ma trasparente come l'aria – qualcosa di sconosciuto ai geologi e ai chimici. Dio solo sa che cosa sia, o da dove sia arrivato o chi l'abbia messo lì."

– Clark Ashton Smith, *The Invisible City* (1932)

Di solito, quando pensiamo alla fisica, pensiamo a qualcosa che si studia in un laboratorio, con esperimenti ripetuti con grande cura che portano a nuove idee sulla natura, ma a volte le grandi scoperte avvengono nei modi e nei luoghi più strani e imprevedibili.

È accaduto per esempio nel 1995, quando nel Mare del Nord, a circa 160 chilometri a sud-ovest della punta meridionale della Norvegia, si è

verificato un evento singolare. Nel 1984, in quella posizione è stata costruita una piattaforma per l'estrazione del gas naturale, chiamata piattaforma Draupner, che è uno snodo importante per il controllo del flusso del gas naturale dalle varie condutture offshore della Norvegia. La prima piattaforma costruita è stata un'installazione con personale a bordo, chiamata Draupner S; nel 1994 vi è stata aggiunta una piattaforma senza personale, la Draupner E, e le due sono state collegate con un ponte di metallo.

La Draupner E era a suo modo un esperimento: era la prima grande piattaforma offshore che utilizzasse fondamenta a *bucket*, in cui cioè la base è sostenuta da cilindri di acciaio affondati nel terreno. Dato l'uso di supporti di nuovo tipo, la piattaforma era dotata di un'ampia schiera di sensori che avrebbero misurato costantemente i suoi movimenti e le sollecitazioni a cui era soggetta, per confermare che la struttura rimanesse stabile, in particolare date le intense tempeste invernali del Mare del Nord.

Il giorno di Capodanno nel 1995, la Draupner E sarebbe stata sottoposta a un test che nessuno avrebbe mai immaginato. Alle tre del pomeriggio, nel bel mezzo di una tempesta, la piattaforma è stata colpita da un'onda mostruosa, di dimensioni molto superiori a quelle che si era pensato fossero possibili. Un telemetro laser installato sulla piattaforma ne ha misurato l'altezza in 25,6 metri, quando l'altezza d'onda significativa in quel tratto di mare era di soli 12 metri, cioè meno della metà di quell'onda anomala. Le dimensioni e la forza immensa di quell'onda sono state registrate anche da altri dispositivi, che hanno confermato che la piattaforma era stata sottoposta a una sollecitazione tremenda, senza precedenti. Per fortuna, la piattaforma stessa aveva subito solo piccoli danni e il personale al momento dell'urto era al sicuro sulla Draupner S, e non si era nemmeno reso conto che fosse successo qualcosa di fuori dall'ordinario.

Per secoli i marinai avevano raccontato di onde mostruose, che comparivano dal nulla, anche in giornate di relativa calma: pareti (in senso letterale) d'acqua che potevano fare a pezzi le navi. Quei racconti erano stati spesso liquidati come fantasiosi: ironicamente, mentre la conoscenza della fisica delle onde in acqua si perfezionava, le teorie tradizionali facevano pensare che onde simili, per quanto possibili, fossero tanto improbabili da non venire mai viste. L'onda della Draupner ha causato una rivoluzione nella fisica delle onde e gli scienziati si sono subito dati da fare per capire le origini di quelle che oggi sono chiamate onde anomale (in inglese *rogue* o *freak wave*), e in pratica hanno fondato un campo del tutto nuovo di ricerche sulle onde.

Oggi si ritiene che molti fattori possano contribuire alla creazione di onde anomale. La focalizzazione delle onde d'acqua, analoga alla focalizzazione della luce a opera di una lente, può far aumentare l'altezza delle onde[1]. Regioni in cui correnti oceaniche opposte collidono possono contribuire all'amplificazione dell'altezza delle onde. Un esempio è la punta meridionale dell'Africa, dove la corrente Agulhas incontra le correnti dirette a est provenienti dall'Atlantico: questa è anche un'area in cui ora si sa che le onde anomale si presentano con una certa regolarità. Il contributo maggiore, però, viene da quello che è noto come un effetto non lineare: in breve, si possono dare circostanze in cui un'onda più grande "mangia" un insieme di onde più piccole, crescendo progressivamente di dimensioni finché non diventa veramente mostruosa.

Oggi si ammette che le onde anomale siano una reale minaccia per i trasporti via mare e per la sicurezza di chi è a bordo delle navi; si pensa che fra il 1969 e il 1994 siano scomparse 22 superpetroliere a causa di queste onde[2]. Anche senza considerare le onde anomale, anche le onde comuni danneggiano le piattaforme offshore e le boe, e

qualsiasi strategia utile a ridurre al minimo i danni sarebbe molto preziosa.

Nel 2012, Mohammad-Reza Alam dell'Università della California a Berkeley ha proposto una soluzione originale: un mantello dell'invisibilità per le onde d'acqua (Figura 16.1). La strategia di Aram sfrutta l'esistenza di onde interne che si possono sviluppare sotto la superficie dell'acqua. Queste onde interne possono essere generate a profondità a cui la densità dell'acqua cambia drasticamente, da un valore costante a un altro.

Se l'acqua non è troppo profonda, le onde superficiali possono interagire con una struttura sul fondo dell'oceano (possiamo chiamarla un "metamateriale oceanico") e si possono progettare strutture di questo genere per accoppiare un'onda superficiale e un'onda interna, e viceversa. Il risultato è che onde pericolose che si avvicinano alla regione dotata di un mantello di invisibilità saranno trasportate *al di sotto* di quella regione, mentre la superficie rimarrà relativamente calma.

I risultati presentati da Alam sono solamente teorici e computazionali, ma evidenziano il fatto che i mantelli dell'invisibilità possono essere utilizzati non semplicemente per rendere invisibile qualcosa, ma anche per proteggere un oggetto. Come afferma lo stesso Alam, "Notiamo che, in riferimento specificamente alle applicazioni negli oceani, i mantelli dell'invisibilità sono più importanti per proteggere gli oggetti da potenti onde in arrivo che per rendere invisibili le loro tracce"[3].
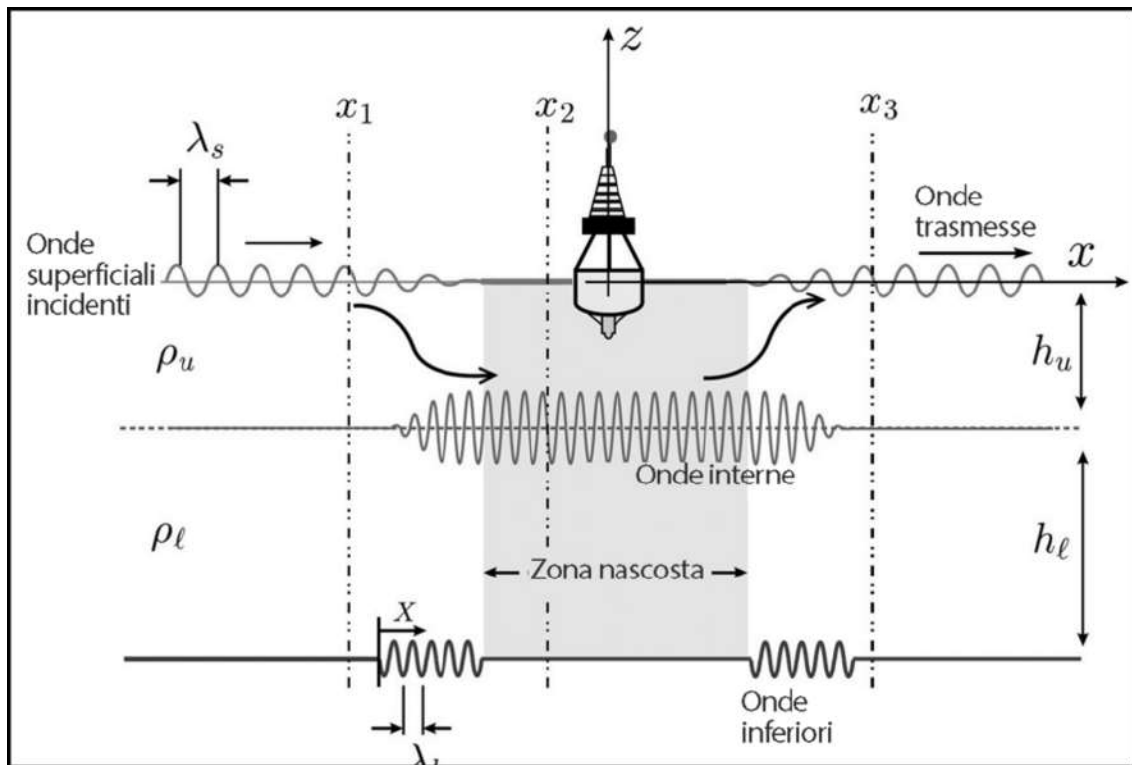
Figura 16.1 Il concetto di mantello dell’invisibilità marina. Illustrazione ristampata con autorizzazione da M.-R, Alam, “Broadband Cloaking in Stratified Seas”, in “Physical Review Letters”, 108, 2012, p. 084502. Copyright 2012 by the American Physical Society.

Il futuro di questa tecnologia potrà quindi non riguardare solo i tentativi di nascondere un oggetto: potenzialmente è anche un modo per proteggere gli oggetti contro i danni inferti da altri tipi di onde. Rispetto all’invisibilità, la protezione è un obiettivo molto più modesto e raggiungibile. Un dispositivo di invisibilità che renda invisibile qualcosa al 50 percento sarebbe un modo assai poco efficace per nasconderlo, ma un mantello oceanico che respinga il 50 percento delle onde pericolose potrebbe fare la differenza fra la sopravvivenza e la distruzione dell’oggetto che protegge. Nel concludere la nostra esposizione della storia dell’invisibilità, possiamo riflettere su come la tecnologia dell’invisibilità possa essere utilizzata per applicazioni al di là dell’occultamento di cose[4].

Tanto per cominciare, notiamo che la matematica dell'ù, fondamentale per i primi progetti di mantelli dell'invisibilità, può essere utilizzata per progettare altri nuovi dispositivi ottici. Nel 2008, per esempio, Do-Hoon Kwon e Douglas H. Werner hanno dimostrato che l'ottica di trasformazione può essere utilizzata per progettare cavi in fibra ottica con "gomiti" a novanta gradi[5]. I cavi a fibra ottica sono una parte importante della nostra infrastruttura di comunicazione e, in sostanza, sono semplicemente lunghi cavi di vetro, sottili e trasparenti, in cui le informazioni possono essere trasmesse mediante impulsi di luce. Quando si piegano molto, però, questi cavi hanno "fuoriuscite" di luce, con perdita di segnale. Kwon e Werner hanno mostrato che è possibile utilizzare l'ottica di trasformazione per progettare un nuovo tipo di curvatura in una fibra ottica che non produca alcuna perdita di luce. Queste "pieghe" potrebbero essere utilizzate per progettare sistemi a fibra ottica che occupino meno spazio.

Possiamo immaginare come funzioni questo processo di progettazione: in parte, la potenza dell'ottica di trasformazione sta nel poter inventare nuovi dispositivi semplicemente con un po' di immaginazione. Prendiamo ancora lo spazio regolare, in cui questa volta passa una comune fibra ottica diritta, e matematicamente tagliamo lo spazio e distorciamo in senso orario il bordo sinistro del taglio intorno al centro della regione (Figura 16.2). Il risultato è una regione con una piega di novanta gradi; possiamo poi determinare il tipo di struttura materiale che produca la distorsione equivalente nello spazio.
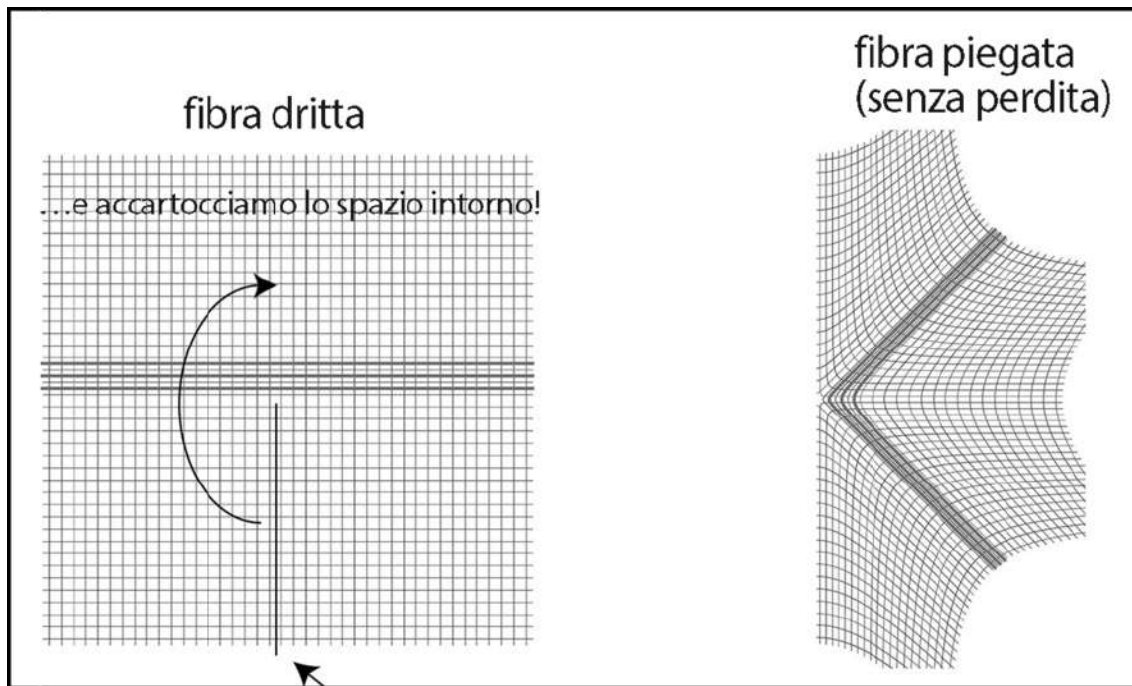
Figura 16.2 L'ottica di trasformazione può essere utilizzata per progettare una fibra ottica che si piega. (Lavoro dell'autore.)

Gli stessi autori hanno utilizzato l'ottica di trasformazione anche per progettare un collimatore di onde, per raccogliere le onde luminose che si propagano in direzioni diverse e inviarle tutte nella stessa direzione; hanno inoltre progettato un nuovo tipo di lente piana per focalizzare le onde di luce. Nello stesso anno, il gruppo di ricercatori della Duke University e dell'Imperial College di cui abbiamo già parlato ha dimostrato come si possa utilizzare l'ottica di trasformazione per produrre divisori di fascio perfetti, che prendano un fascio di luce e lo dividano in due fasci uguali, senza che parte della luce venga riflessa. Nel 2012, ricercatori della Vanderbilt University hanno mostrato che l'ottica di trasformazione può essere utilizzata per progettare dispositivi che trasmettano la luce da fibre ottiche a microchip di silicio con perdite minime. In futuro, può darsi che l'ottica di trasformazione contribuisca a trasformare la nostra tecnologia di comunicazione[6].

L’uso più curioso dell’ottica di trasformazione, però, è stato lo studio dei mantelli dell’invisibilità per altri tipi di onde e di campi. La luce è un’onda elettromagnetica, il che significa che è una combinazione di campi elettrici e magnetici, che oscillano rapidamente insieme. Subito dopo l’introduzione di mantelli dell’invisibilità per la luce, i ricercatori hanno iniziato a studiare se sia possibile creare mantelli che nascondano oggetti da campi elettrici e magnetici *statici*, cioè che non variano nel tempo. Fra questi potrebbero rientrare, per esempio, il campo elettrico prodotto da potenti condensatori elettrici, nonché i campi magnetici prodotti da potenti magneti permanenti.

Nel 2007, Ben Wood e John Pendry hanno progettato i primi metamateriali in grado di funzionare con campi magnetici statici. Il loro progetto richiede l’uso di superconduttori, materiali con resistenza elettrica nulla, disposti in una serie di piastre che sono poi assemblate a formare un mantello magnetico. L’anno successivo, Wood, Pendry e collaboratori hanno dimostrato che quei metamateriali superconduttori funzionano come previsto dalla teoria, anche se non sono arrivati fino al punto da costruire un mantello[7].

Nel 2009, ulteriori simulazioni di metamateriali magnetici composti da sottili piastre superconduttrici sono state effettuate da ricercatori in Spagna (gli stessi ricercatori che in seguito avrebbero costruito il “cunicolo magnetico”). Nel 2012, quei ricercatori hanno collaborato con un team slovacco e hanno presentato un nuovo progetto, più semplice, per un mantello magnetico, e hanno dimostrato sperimentalmente che funzionava come previsto. La tecnica è elegante nella sua semplicità: consiste di un anello di ferro ferromagnetico circondato da un anello superconduttore. L’anello di ferro attira le linee del campo magnetico, mentre l’anello superconduttore le respinge. Se si sceglie opportunamente lo spessore dell’anello di ferro, il sistema nel suo insieme respingerà le linee di campo magnetico dalla regione

rivestita dal mantello, senza produrre alcuna distorsione del campo magnetico all'esterno del dispositivo[8].

Sempre nel 2012, ricercatori di Lanzhou e Nanjing in Cina hanno dimostrato sperimentalmente un dispositivo per l'invisibilità che protegge da campi elettrici statici[9].

Quali potrebbero essere le applicazioni di questi mantelli per campi statici? I sistemi informatici moderni possono essere molto sensibili ai danni dovuti a scariche di elettricità statica; l'elettronica che deve essere collocata vicino a dispositivi elettrici potenti potrebbe essere schermata con l'uso di un mantello per l'elettricità statica. Nella risonanza magnetica si utilizzano magneti molto potenti, che producono nelle vicinanze forze tanto intense che gli operatori devono stare molto attenti a non portare oggetti contenenti ferro. Si potrebbe utilizzare un mantello magnetico per posizionare dispositivi elettronici più vicino ai sistemi MRI.

L'ottica di trasformazione è stata utilizzata per progettare tipi ancora più strani di mantelli. Sempre nel 2012, ricercatori francesi hanno presentato il concetto di "termodinamica di trasformazione": l'uso di tecniche di trasformazione per controllare flussi di calore anziché onde[10]. Il calore comune, che è la manifestazione del moto casuale delle molecole, non si propaga come un'onda, ma si diffonde in una regione. È impossibile tenere il calore lontano da una regione indefinitamente; una bottiglia fredda in una giornata calda, se si lascia trascorrere abbastanza tempo, finirà per scaldarsi fino a raggiungere la temperatura esterna. Utilizzando la termodinamica di trasformazione, però, i ricercatori hanno dimostrato di poter rallentare il flusso di calore nella regione rivestita dal mantello. Un mantello termico, combinato con un isolamento termico tradizionale, potrebbe fornire una maggiore resistenza al calore.

Sono stati presentati e simulati anche mantelli per le onde acustiche. Nel 2008, un gruppo internazionale ha studiato un simile guscio di invisibilità acustica. I mantelli acustici non hanno il problema dei limiti relativistici che affligge i mantelli ottici, perciò la loro implementazione può essere molto più facile; nel 2011, ricercatori dell'Università dell'Illinois a Urbana-Champaign hanno effettivamente progettato e testato sperimentalmente un mantello acustico per onde a ultrasuoni[11].

In genere si associa l'espressione "onda acustica" alle onde sonore che si propagano nell'aria, ma le onde acustiche si possono propagare anche nei solidi. Le ricerche sull'invisibilità acustica hanno portato in modo naturale a una possibilità ancora più sconcertante: mantelli sismici, cioè protezioni da onde sismiche. Una prima menzione di questa possibilità si trova in un articolo pubblicato sulla rivista *Physical Review Letters* da ricercatori di Marsiglia, in Francia, e Liverpool, nel Regno Unito[12]. I ricercatori hanno dimostrato computazionalmente la possibilità di rivestire con un mantello una regione incorporata in una sottile piastra piana, per renderla invisibile alle vibrazioni indotte nella piastra. Hanno ipotizzato varie possibili applicazioni di questa tecnologia: proteggere, per esempio, parti delicate delle automobili dalle vibrazioni costanti dovute alla pavimentazione stradale e, su scala molto più grande, proteggere strutture da onde sismiche pericolose.

Le onde sismiche sono molto più complicate di quelle elettromagnetiche; se ne distinguono quattro grandi tipologie: onde P, onde S, onde di Rayleigh e onde di Love. Le onde di Rayleigh e le onde di Love sono onde superficiali (la maggior parte dell'attività sismica è limitata alla superficie); le onde P e S si estendono più in profondità. Le onde P ("primarie") sono onde longitudinali e sono le più veloci; sono quelle che vengono rilevate per prime in caso di

terremoto. Le onde S ("secondarie") sono onde trasversali, che producono oscillazioni perpendicolari alla loro direzione di propagazione e sono più lente delle primarie. Le onde di Rayleigh (previste da Lord Rayleigh nel 1885) sono onde superficiali longitudinali che hanno come risultato una sorta di rollio del terreno, un po' come il movimento ascendente e discendente delle onde nell'acqua. Le onde di Love sono onde orizzontali trasversali, che fanno vibrare il terreno in orizzontale, in direzione perpendicolare a quella di propagazione.

Data questa grande varietà di onde, che possono propagarsi con un ampio intervallo di lunghezze d'onda, probabilmente non è possibile schermare completamente una struttura da tutte le onde sismiche. Un mantello sismico che blocchi una parte significativa delle onde sismiche, però, può essere un complemento alle strutture antisismiche esistenti, per renderle ancora più stabili durante un evento sismico.

Nel caso delle onde sismiche sorge anche un altro problema: non è sensato, e nemmeno moralmente corretto, progettare un mantello che guidi le onde sismiche intorno a una struttura e le faccia proseguire per la loro strada; i proprietari dell'edificio direttamente alle spalle di quello protetto potrebbero non esserne molto felici. Nel 2012, un ricercatore coreano-australiano ha avanzato la prima proposta dettagliata di un mantello per i terremoti che adotta un'impostazione un po' diversa alla protezione[13]. Il metamateriale sismico, costituito da un gran numero di metastrutture sepolte nel terreno intorno all'edificio da proteggere, non guiderebbe le onde ma ne convertirebbe l'energia in suono e calore, probabilmente producendo un frastuono incredibile ma salvando l'edificio al suo centro. Considerate le grandi lunghezze d'onda delle onde sismiche, le singole metastrutture erano pensate come cilindri alti parecchi metri.

La ricerca era puramente teorica, perciò resta l’interrogativo: un mantello sismico funzionerebbe in pratica? Sempre nel 2012, ricercatori tedeschi hanno costruito e testato un prototipo del mantello acustico del gruppo di Marsiglia e Liverpool e ne hanno confermato la realizzabilità. Il dispositivo aveva un diametro nell’ordine dei centimetri solamente, ma gli autori ipotizzavano che potesse essere portato a dimensioni adeguate alla protezione dai terremoti[14].

Sarebbe presto seguita una dimostrazione ancora più impressionante. Nel 2012, i ricercatori di Marsiglia hanno condotto il primo test pratico (e di successo) di un metamateriale sismico alla periferia della città di Grenoble, praticando una serie di fori profondi 5 metri per formare il metamateriale[15]. In base alle simulazioni, i fori erano stati progettati in modo da bloccare le onde sismiche generate da una “sonda vibrante”. Dalla parte opposta del metamateriale è stata disposta una serie di sensori per vedere se qualche onda poteva penetrare la struttura (Figura 16.3). I risultati hanno indicato che il metamateriale bloccava e attenuava in modo significativo le onde emesse dalla sorgente.
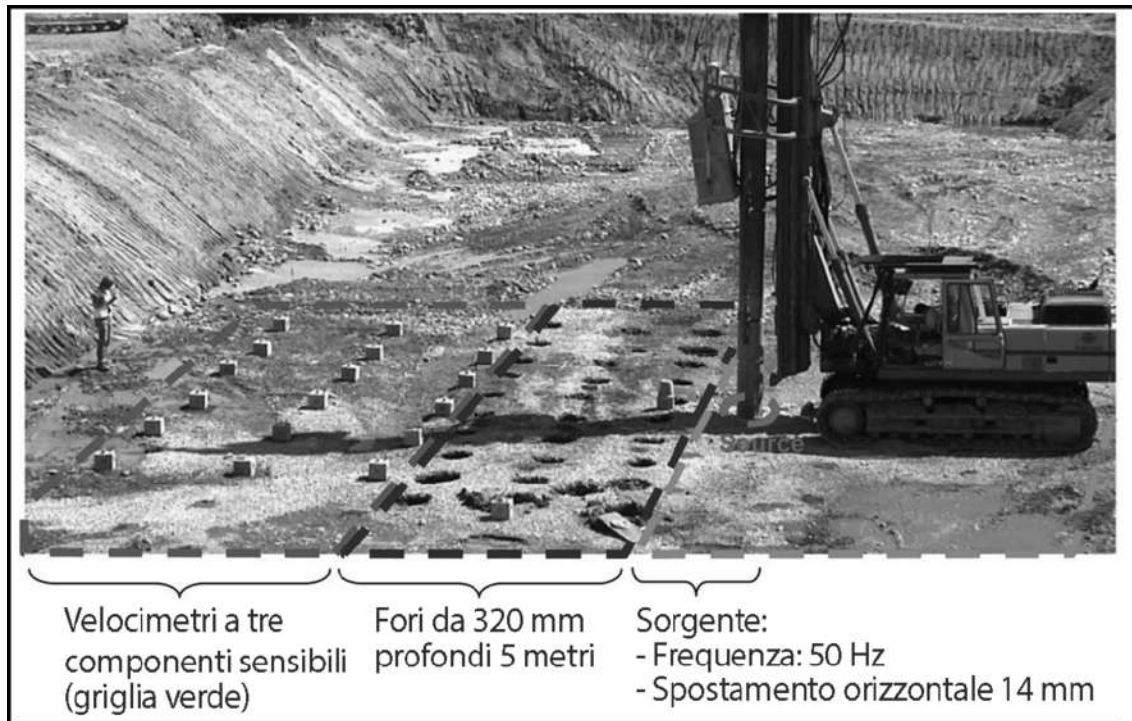
Figura 16.3 Il test del metamateriale sismico effettuato vicino a Grenoble nel 2012. Illustrazione da S. Brule, E.H. Javelaud, S. Enoch, S. Guenneasu, “Experiments on Seismic Metamaterials: Molding Surface Waves”, in “Physical Review Letters”, 112, 2014, p. 133901- Licensed by CC BY 3.0.

Un metamateriale sismico sarebbe efficace nel caso di un vero terremoto? La natura ha già fornito qualche indicazione positiva. Nel 2016, ricercatori del Regno Unito e di Francia hanno studiato l’efficacia dei boschi come schermo dell’attività sismica. Utilizzando come sorgente il rumore sismico ambientale, i ricercatori hanno misurato l’attività sismica all’interno e subito all’esterno di un bosco a Grenoble. Hanno scoperto che le onde di Rayleigh venivano bloccate dall’interno del bosco per un ampio intervallo di lunghezze d’onda. Andando oltre, alcuni dei ricercatori si sono chiesti se fosse possibile progettare un bosco in grado di bloccare certe classi di onde sismiche. Con le simulazioni, hanno stabilito che un bosco opportunamente progettata potrebbe non solo ostacolare le onde di Love ma addirittura convertirle in altre onde sismiche che si propaghino senza fare danni

verso l’interno della Terra. Quest’ultima strategia ricorda il mantello marino di Mohammad-Reza Alam, che era stato pensato per convertire le onde superficiali dell’oceano in onde di profondità[16].

Se alberi piantati in posizioni opportune possono sopprimere onde sismiche, allora gli edifici potrebbero assolvere allo stesso compito. Si era notato da tempo che le onde sismiche si propagano in modo diverso, e possono essere soppresse, nelle aree urbane. Il gruppo di ricerca di Marsiglia ha esteso l’idea e ha immaginato megastrutture sismiche: interi quartieri in cui gli edifici sono progettati e collocati specificamente in modo da comportarsi insieme come un metamateriale sismico che ostacola la propagazione delle onde. Stavano, a tutti gli effetti, immaginando un’intera città invisibile – per lo meno, invisibile alle onde sismiche.

I ricercatori avevano in serbo un’ulteriore sorpresa. Mentre svolgevano le ricerche per scrivere il loro articolo di rassegna sui metamateriali sismici, hanno notato una stupefacente somiglianza fra il disegno dei metamateriali dei mantelli dell’invisibilità e le strutture di sostegno di antichi teatri gallo-romani (Figura 16.4)[17]. Quei teatri non erano progettati come mantelli dell’invisibilità sismica, ma la loro configurazione, anche senza volerlo, forse li ha fatti comportare come quei mantelli. Gli autori dell’articolo ipotizzano che questa struttura accidentalmente a metamateriale sismico abbia potuto consentire a molti di quei teatri di rimanere in piedi, nonostante i terremoti che hanno distrutto altri edifici.
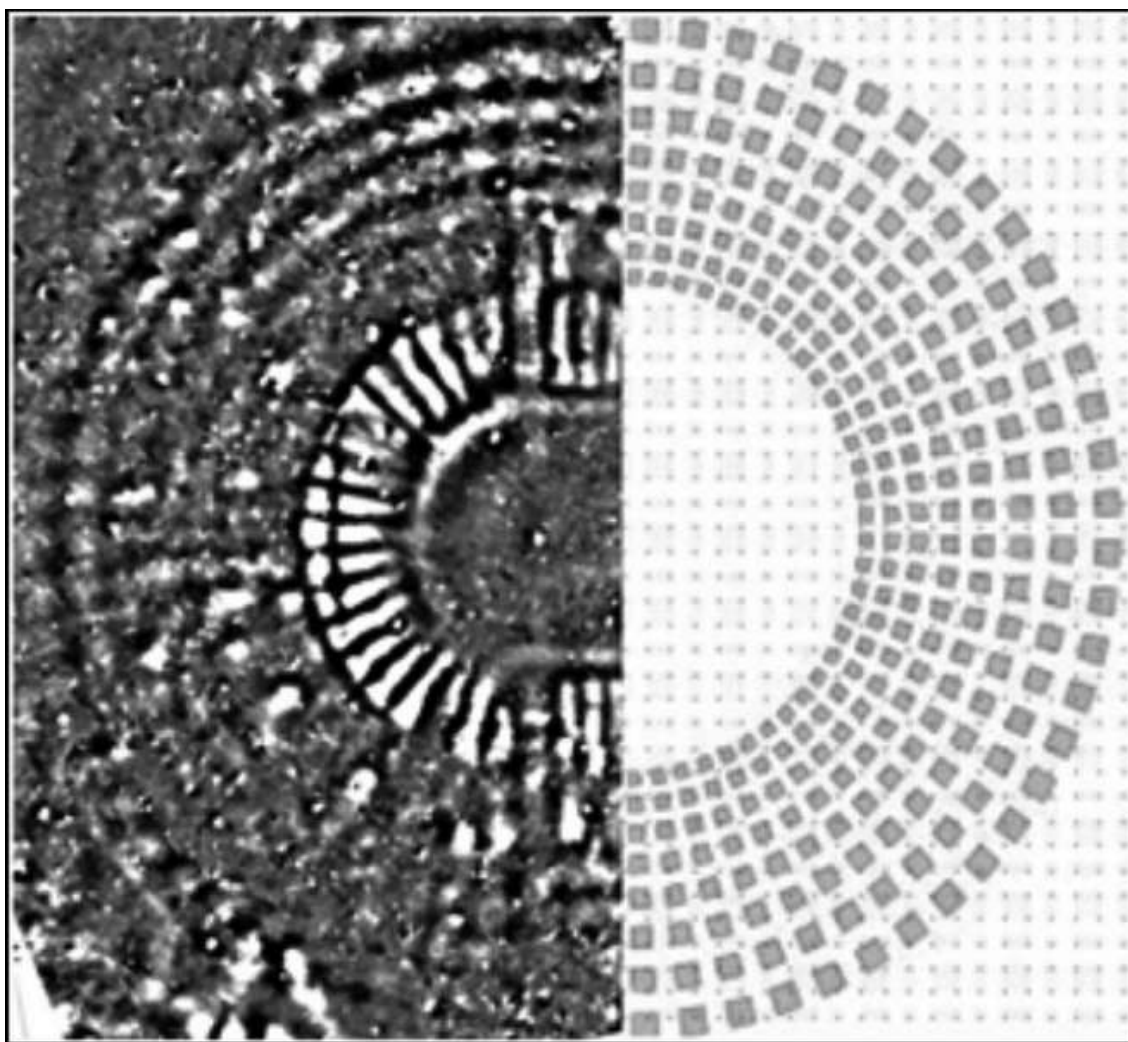
Figura 16.4 Confronto fra la mappa del gradiente magnetico di un teatro gallo-romano ad Autun, La Genetoye, in Francia, e la struttura di un mantello dell'invisibilità basato su metamateriale. Illustrazione tratta da S. Brule, S. Enoch, S. Guenneay, “Role of Nanophotonics in the Birth of Seismic Megastructures”, in “Nanophotonics”, 8, 2019, pp. 1591-1605. Licensed by CC BY 4.0.

A questo punto, però, cercando di immaginare il futuro dei mantelli dell'invisibilità, siamo arrivati a chiudere il cerchio con lo spunto iniziale del libro. Quando Zeus gli dà un elmo dell'invisibilità nell'anfiteatro della città di Giaffa, forse Perseo era a sua volta all'interno di un mantello dell'invisibilità sismica!

Vedremo utilizzato in un contesto pratico qualcuno di questi progetti per l'invisibilità e i mantelli? È chiaro che restano da superare molte difficoltà, per implementare mantelli per qualsiasi tipo di onde, ed è possibile che non si riuscirà mai a superarle completamente. Tuttavia, come mi sono reso conto nel 2006 quando ho sbagliato la mia previsione sul momento in cui sarebbero stati effettuati i primi esperimenti sui mantelli, il futuro dell'invisibilità è molto difficile da prevedere.

---

1 In effetti, gli studiosi di ottica hanno utilizzato le onde di luce come sostituto per le onde d'acqua, per studiare in modo affidabile e sicuro come si verifichino le onde anomale.

2 Dysthe, Krogstad e Müller, "Oceanic Rogue Waves".

3 Alam, "Broadband Cloaking in Stratified Seas".

4 A questo punto dovrei notare che esistono moltissimi risultati pubblicati dopo il 2006 su mantelli dell'invisibilità di vario tipo. Il meglio che posso fare qui è evidenziare alcuni risultati interessanti. Le mie scuse agli autori il cui lavoro non è citato: non si tratta di un giudizio sulle loro ricerche.

5 Kwon e Werner, "Transformation Optical Designs for Wave Collimators".

6 Rahm et al., "Optical Design of Reflectionless Complex Media"; Markov, Valentine e Weiss, "Fiber-to-Chip Coupler".

7 Wood e Pendry, "Metamaterials at Zero Frequency"; Magnus et al., "A d.c. Magnetic Material".

8 Navau et al., "Magnetic Properties of a dc Metamaterial"; Gömöry et al., "Experimental Realization of a Magnetic Cloak".

9 Yang et al., "dc Electric Invisibility Cloak".

10 Guenneau, Amra, and Veyante, "Transformation Thermodynamics".

11 Cummer et al., "Scattering Theory Derivation of a 3D Acoustic Cloaking Shell"; Zhang, Xia e Fang, "Broadband Acoustic Cloak for Ultrasound Waves".

12 Farhat, Guenneau e Enoch, "Ultrabroadband Elastic Cloaking in Thin Plates".

13 Kim and Das, "Seismic Waveguide of Metamaterials".

14 Stenger, Wilhelm e Wegener, "Experiments on Elastic Cloaking in $in Plates".

15 Brûlé et al., "Experiments on Seismic Metamaterials".

16 Colombi et al., "Forests as a Natural Seismic Metamaterial"; Maruel et al., "Conversion of Love Waves in a Forest of Trees".

17 Brûlé, Enoch e Guenneau, “Role of Nanophotonics in the Birth of Seismic Megastructures”.

Appendice A

Come creare un vostro dispositivo per l'invisibilità

> Il segreto della loro invisibilità stava nella loro epidermide, corrispondente alla nostra pelle, che *rifrangeva* tutta la luce fra l'ultravioletto e l'infrarosso, lo spettro grazie al quale noi esseri umani possiamo vedere; la faceva passare intorno a loro in modo che ai nostri occhi apparissero perfettamente trasparenti. Ho fatto la stessa cosa con un gruppo di prismi rifrangenti.
> – Arthur Leo Zagat, *Beyond the Spectrum* (1934)

Nota: alcuni degli esperimenti elencati qui di seguito prevedono l'uso di materiali pericolosi o che possono diventare pericolosi se utilizzati in modo non corretto. Se chi legge vorrà condurre questi esperimenti dovrà farlo a proprio rischio. L'autore e l'editore non garantiscono la sicurezza delle persone che utilizzino queste procedure e specificamente non si assumono alcuna responsabilità, diretta o indiretta, per quanto possa derivare dall'uso o dall'applicazione delle informazioni contenute in questa appendice. Se volete eseguire qualcuno di questi esperimenti, assicuratevi di prendere le opportune precauzioni per la vostra sicurezza e di conoscere i rischi possibili.

Come abbiamo visto, i veri mantelli dell'invisibilità richiedono materiali e processi di fabbricazione molto complessi, e probabilmente sono molto lontani dalla realizzazione, se mai lo saranno. Esistono però vari modi in cui potete divertirvi con l'invisibilità direttamente in casa vostra, e vale la pena descriverne qualcuno.

La tecnica più facile per ottenere una dimostrazione, che davvero cattura l’attenzione, è la corrispondenza degli indici di rifrazione. Molti negozi per il fai da te vendono confezioni di “perle d’acqua”, che possono essere utilizzate al posto del terriccio per le piante da appartamento. Le perle sono fatte di un gel polimerico che assorbe acqua e, quando sature, sono costituite da acqua per il 90 percento. Il loro indice di rifrazione perciò è molto vicino a quello dell’acqua e, se le immergete in un bicchiere d’acqua, sembrerà che scompaiano completamente. Questo esperimento ricorda un po’ la descrizione del vetro in polvere immerso nell’acqua, contenuta ne *L’uomo invisibile*.

Poiché le perle d’acqua sono comunque costituite prevalentemente da acqua, l’esempio precedente può sembrare un modo di barare, per quanto riguarda la corrispondenza degli indici. Un esperimento alternativo si può condurre con vetro Pyrex e olio minerale. Le aste di agitazione in Pyrex si possono ordinare online e non costano molto; l’olio minerale si può acquistare in farmacia. (L’olio minerale di solito è utilizzato come lassativo, perciò preparatevi a vedere qualche sguardo strano, se andate ad acquistarne litri alla volta.) Il Pyrex ha quasi lo stesso indice di rifrazione dell’olio minerale per la luce visibile e, quando si immerge l’asta di Pyrex nell’olio, sembra che si fonda in corrispondenza della superficie.

Con un po’ più di fatica e una configurazione diversa, è addirittura possibile dimostrare, sia pure rozzamente, i principi dell’invisibilità. (Un grazie particolare ai colleghi Mike Fiddy e Robert Ingel che mi hanno fatto conoscere questa dimostrazione.) Per produrre l’effetto sono necessari otto prismi rettangolari di vetro, che si possono trovare nei negozi online di articoli scientifici per pochi euro. I prismi vanno disposti come nella Figura A.1. Chi si mette di lato potrà vedere gli oggetti che stanno dietro il mantello ma non potrà vedere ciò che si trova al suo interno.

Questo mantello sfrutta il fenomeno della riflessione interna totale. Quando la luce viene riflessa dalla superficie interna del vetro a un angolo superiore a un certo angolo critico, viene riflessa totalmente. Se si guarda il mantello di prismi dalla direzione indicata nella figura, tutta la luce che si vede è riflessa totalmente dalle quattro superfici interne, perciò si ha un'immagine molto chiara di oggetti che si trovano dietro il mantello, ma non si vedono gli oggetti al suo interno.

Per rendere l'effetto ancora più pronunciato, i prismi possono essere incollati fra loro con una colla per vetro con indice di rifrazione corrispondente, ma ho scoperto che basta accostare bene i prismi fra loro per ottenere una dimostrazione.

Si possono esplorare con relativa facilità anche i concetti della trasparenza, seguendo le orme di Isaac Newton. Si può bagnare della carta in olio vegetale o olio d'oliva per renderla trasparente; come abbiamo detto nel corso del libro, l'olio riempie gli spazi fra le fibre della carta, riduce la quantità di luce diffusa e rende la carta trasparente. Un'altra possibilità è acquistare l'*oculus mundi* ("l'occhio del mondo") di Newton: questa pietra, chiamata anche lapis mutabilis o idrofano, è un opale poroso che diventa trasparente quando è imbevuto d'acqua.
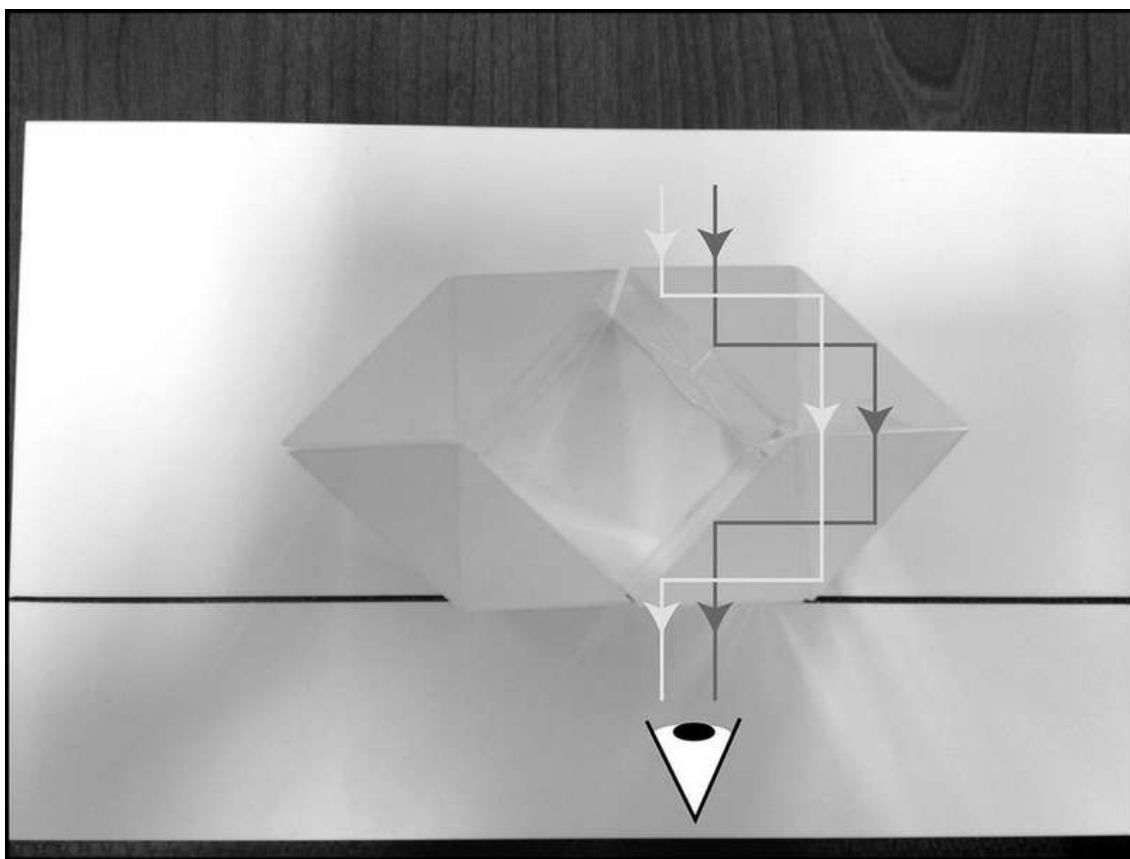
Figura A.1 Vista dall’alto di un mantello fatto di prismi. Se si guarda dalla direzione indicata nell’illustrazione, si può vedere che cosa c’è dietro il mantello, ma non ciò che è al suo interno.

Anche in questo caso, l’acqua riempie i pori dell’opale, riduce la diffusione della luce e aumenta la trasparenza. È possibile acquistare campioni di opale idrofano online a prezzi contenuti.

Vale la pena, per ragioni storiche, citare un’altra dimostrazione dell’invisibilità, anche se non l’ho mai ripetuta personalmente. Nel 1902, il fisico Robert Williams Wood pubblicò un articolo intitolato “The Invisibility of Transparent Objects”, probabilmente il primo articolo scientifico dedicato allo studio della fisica dell’invisibilità, sia pure in un senso limitato.

Non si trattava di un grande salto per la fervida immaginazione di Wood, che non era solo un influente fisico specializzato nell’ottica, ma

anche un autore di fantascienza: nel 1915 pubblicò, con Arthur Train, *The Man Who Rocked the Earth*, un romanzo su uno scienziato che costringe tutte le nazioni del mondo alla pace con armi nucleari. Il romanzo colpisce particolarmente, perché fu pubblicato circa trent'anni prima che venisse costruita un'arma nucleare. Nel 1916, i due autori pubblicarono un seguito, *The Moon Maker*, che è forse il primo racconto di fantascienza in cui si parla di lanciare una nave spaziale per distruggere un asteroide prima che entri in collisione con la Terra.

Nel suo articolo sugli oggetti trasparenti, Wood cercava di confermare un'ipotesi formulata da un altro famoso fisico, Lord Rayleigh. Vari anni prima, nel suo "Geometrical Objects", Rayleigh aveva ipotizzato che l'unico motivo per cui gli oggetti trasparenti si possono vedere fosse perché di solito vengono illuminati in maniera non uniforme, cioè la quantità di luce che incide su un lato dell'oggetto è maggiore di quella che incide sull'altro lato. Rayleigh ipotizzava che un oggetto trasparente posto in una regione in cui la luce provenisse in pari misura da tutte le direzioni (per esempio, un oggetto nella nebbia fitta) sarebbe stato effettivamente invisibile.

Questa vecchia ipotesi quasi certamente non è vera in generale, ma Wood escogitò un metodo ingegnoso per metterla alla prova. Citiamo direttamente le sue parole:

> Recentemente ho escogitato un metodo grazie al quale si può ottenere molto facilmente un'illuminazione uniforme e si può illustrare la scomparsa degli oggetti trasparenti quando vi sono immersi. Il metodo, in breve, consiste nel collocare l'oggetto all'interno di un globo cavo, la cui superficie interna sia ricoperta con la vernice luminosa di Balmain, e guardare l'interno attraverso un piccolo foro. […]
> Se le superfici interne vengono esposte a una luce diurna intensa, al sole o alla luce elettrica e l'apparato poi viene portato in una stanza buia, e vi sono collocati all'interno una sfera di cristallo o il tappo di vetro lavorato di una caraffa, si scoprirà che risulta quasi completamente invisibile, se si guarda attraverso la piccola apertura. Una fluorescenza blu uniforme riempie l'interno del globo e solo l'osservazione più attenta permette di cogliere la presenza di un oggetto solido al suo interno. Possono comparire

una o due delle facce laterali del tappo, se per caso riflettono o mostrano per rifrazione qualche parte della linea di giunzione dei due emisferi.

In breve: Wood ha preso i due emisferi di un globo, ne ha rivestito l'interno di vernice fluorescente, ha praticato un forellino da cui poter osservare l'interno, ha collocato un oggetto di vetro all'interno e ha unito i due emisferi. In base ai suoi risultati, l'oggetto di vetro era a malapena visibile.

Sono arrivato fino ad acquistare emisferi di plastica e vernice fluorescente a spruzzo, ma non mi sono ancora deciso ad assemblare il dispositivo per metterlo alla prova. Come si dice spesso nei manuali di fisica, lo lascio come esercizio per chi legge!

Appendice B

Invisibibliografia

Presento questa “invisibibliografia” (in ordine cronologico) per quanti fossero interessati a leggere tutti i racconti classici sull’invisibilità, compresi molti che non sono stati citati nel libro. Mi sono limitato prevalentemente a opere di fantascienza e horror, ma sono incluse anche alcune più vicine al genere fantastico. Mi sono concentrato soprattutto su racconti pubblicati prima del 1960, con qualche eccezione degna di nota. Considerato quanti sono i titoli che ho trovato sfogliando rapidamente le vecchie riviste di pulp fiction, l’elenco sicuramente non è completo. [Sono riportati i titoli originali e, ove sia stato possibile individuarne una traduzione, il titolo in italiano, fra parentesi quadre.]

- *The Invisible Spy*, di Explorabilis [pseudonimo di Eliza Haywood] (1754). Il narratore ottiene una cintura dell’invisibilità da un mago in punto di morte e la usa finendo in varie disavventure.
- *The Invisible Gentleman*, di James Dalton (1833). Un uomo desidera l’invisibilità e scopre che gli è stata data, il che lo porta a guai di ogni genere.
- *What Was It?*, di Fitz-James O’Brien (1859) [trad. it. *Che è stato*, in Fitz-James o’Brien, *La lente di diamante e altri racconti*, La casa Usher, Firenze 1992]. Il primo racconto che presenti una spiegazione scientifica dell’invisibilità, per spiegare un mostro invisibile.

- *The Crystal Man*, di Edward Page Mitchell (1881). Un uomo viene sottoposto a un esperimento e rimane in uno stato invisibile.
- *Le Horla*, di Guy de Maupassant (1886) [trad. it. *L'Horla*, in Guy de Maupassant, *Racconti dell'incubo e del mistero*, a cura di Luca Salvatore, Feltrinelli, Milano 2019]. Un parigino è tormentato da un essere invisibile che si è installato nella sua casa.
- *The Damned Thing*, di Ambrose Bierce (1893) [trad. it. *La cosa maledetta*, in Ambrose Bierce, *Tutti i racconti vol. 1: I racconti dell'orrore*, Fanucci, Roma 2005].
- *Stella* di C.H. Hinton (1895). Un esecutore testamentario scopre che una delle case dell'eredità è occupata da una donna che è diventata invisibile per non avere a che fare con i difetti degli uomini.
- *The Invisible Man*, di H.G. Wells (1897) [trad. it. *L'uomo invisibile*; varie edizioni in lingua italiana; la citazione nel Capitolo 8 è tratta dall'edizione Rizzoli BUR, Milano 1960]. Il classico. Uno scienziato si rende invisibile e scopre che non è divertente come sembrava.
- *Le Secret de Wilhelm Storitz*, di Jules Verne (ca. 1897) [trad. it. *La fidanzata invisibile – Il segreto di Wilhelm Storitz*, Robin, Torino 2023]. Un tedesco malvagio si ripropone di distruggere la felicità della donna che lo ha respinto. [L'edizione italiana propone sia il manoscritto di Verne, sia la versione pubblicata dal figlio.]
- *The Shadow and the Flash*, di Jack London (1906) [trad. it. *L'ombra e il baleno*, in *L'ombra e il baleno. Cinque racconti scelti da J.L. Borges*, Marietti 1992; anche, con il titolo *L'ombra e il bagliore*, in *Faccia di Luna e altre storie*, Landscape Books, 2002]. Due scienziati rivali scoprono due metodi diversi per rendersi invisibili e finiscono per andare incontro a una morte violenta.

- *The Thing Invisible*, di William Hope Hodgson (1912). Uno dei suoi famosi racconti della serie “Carnacki il cacciatore di fantasmi”. Qui Carnacki indaga su una cappella che si presume infestata da uno spirito assassino e si convince che un nemico invisibile attacchi le persone di notte. Alla fine, non è una vera storia sull’invisibilità, ma l’ho inclusa perché per gran parte del racconto Carnacki pensa che di quello si tratti.
- *The Sea Devils*, di Victor Rousseau (1916). Il capitano di un sottomarino scopre l’esistenza di una razza di umanoidi invisibili che vivono sotto i mari, riesce a sopravvivere ai loro attacchi e avvisa il mondo emerso della loro prossima invasione. In origine un racconto a puntate, è stato pubblicato in libro nel 1924.
- *The People of the Pit*, di A. Merritt (1918). Un cercatore nelle zone selvagge dell’Alaska si imbatte in un burrone nascosto, pieno di esseri invisibili, non umani e malevoli.
- *The Thing from – “Outside”*, di George Allen England (1923). Un gruppo di esploratori in una zona selvaggia si rende conto di essere pedinato da un essere superintelligente invisibile, che li considera poco più che oggetti di osservazione.
- *The Monster-God of Mamurth*, di Edmond Hamilton (1926). Un archeologo segue le indicazioni di antiche iscrizioni fino a una città perduta, dove trova un tempio invisibile, e al suo interno un mostro invisibile immortale.
- *The Man Who Could Vanish*, di A. Hyatt Verrill (1927). Uno scienziato mostra a un amico il suo nuovo metodo per l’invisibilità, e al culmine della dimostrazione fa scomparire un edificio. Utilizza (unico a farlo) un’eterodina ottica come spiegazione dell’invisibilità.
- *Beyond Power of Man*, di Paul Ernst (1928). Un uomo acconsente a esplorare una casa che si dice infestata e finisce intrappolato

dall’essere invisibile che vi si aggira.

- *The Dunwich Horror*, di H.P. Lovecraft (1929) [trad. it. *L’orrore di Dunwich*, in H.P. Lovecraft, *Tutti i racconti*, Mondadori, Milano 2017]. Il clan corrotto dei Whateley stringe un patto con un orrore cosmico; quando muore l’ultimo appartenente al clan, l’essere invisibile che tenevano segregato in casa diventa una furia.
- *The Shadow of the Beast*, di Robert E. Howard (ca. 1930). Un uomo insegue un criminale ricercato in una casa che si dice infestata. Lo trova morto e viene braccato da un mostro, uno spirito o un animale di cui non si vede altro che l’ombra mostruosa. Mai pubblicato durante la vita dell’autore, è stato infine stampato nel 1977.
- *The Cave of Horror* di Captain S.P. Meek (1930). Quando alcune persone scompaiono inspiegabilmente nella Mammoth Cave, in Kentucky, il dottor Bird viene chiamato a risolvere il mistero. Scopre che dalle profondità della Terra è salito in superficie per nutrirsi un mostro invisibile. Un racconto sorprendentemente divertente, con una bella descrizione dell’invisibilità basata sui raggi ultravioletti.
- *Invisible Death*, di Anthony Pelcher (1930). Dopo l’omicidio di un inventore, una grande azienda viene ricattata da qualcuno che si fa chiamare “Morte Invisibile”. L’azienda incarica il suo migliore scienziato di indagare e catturare il criminale. Qui è presentata l’idea che l’invisibilità sia generata da vibrazioni, un approccio originale.
- *The Invisible Master*, di Edmond Hamilton (1930). Uno scienziato inventa l’invisibilità, il suo dispositivo viene rubato e presto un criminale invisibile getta nel panico la città. La vicenda però non è quello che sembra essere e contiene una delle migliori

descrizioni dell'invisibilità e dell'ottica che abbia letto in uno di questi racconti.

- *The Attack from Space*, di Captain S.P. Meek (1930). Alieni simili a scarafaggi invadono la Terra al fine di catturare schiavi per le loro miniere di radio su Mercurio. Fermarli è quasi impossibile, perché hanno navi spaziali invisibili.
- *The Invisible Death*, di Victor Rousseau (1930). No, non ci vedete doppio: esistono due racconti su una "morte invisibile" dello stesso anno – e pubblicati sulla stessa rivista. Gli Stati Uniti sono minacciati dall'"Imperatore Invisibile" e dai suoi eserciti, che hanno la capacità di rendersi invisibili con i loro mezzi aerei e i loro edifici. Seminano una scia di distruzione in tutto il paese, e sta a un pilota e a uno scienziato trovare il modo di fermarli.
- *Terrors Unseen*, di Harl Vincent (1931). Robot invisibili. Robot. Invisibili. Devo dire altro? Un'altra vicenda di invisibilità grazie agli ultravioletti.
- *The Face in the Abyss*, di A. Merritt (1931) [trad. it. *Il volto nell'abisso*, Fanucci, Roma 1981]. Un esploratore in cerca di un tesoro perduto si imbatte invece in una civiltà scomparsa, una divinità imprigionata e creature invisibili.
- *The Murderer Invisible*, di Philip Wylie (1931). Uno scienziato pazzo si rende invisibile e crea un regno del terrore.
- *Raiders Invisible*, di D.W. Hall (1931). Dirigibili impegnati in giochi di guerra vengono sabotati in modo misterioso. Il pilota Chris Travers individua la causa e scopre una cospirazione dei sovietici, armati del potere dell'invisibilità, per distruggere il Canale di Panama. Un altro racconto che utilizza i "raggi di Röntgen" per rendere l'indice di rifrazione di un corpo corrispondente a quello dell'aria.

- *The Radiant Shell* di Paul Ernst (1932). Il malvagio governo arvaniano ottiene i progetti di un raggio termico mortale e lo scienziato Thorn Winter si offre volontario per rendersi invisibile, intrufolarsi nell'ambasciata arvaniana e recuperare i progetti.
- *The Invisible City*, di Clark Ashton Smith (1932). Archeologi che si sono smarriti nel deserto, si imbattono in una città invisibile e nei suoi invisibili abitanti alieni. Sospetto che sia stato ispirato dal racconto di Hamilton citato sopra.
- *Salvage in Space*, di Jack Williamson (1933). Un minatore spaziale si imbatte in un nave spaziale abbandonata e scopre che è custodita da un mostruoso clandestino invisibile.
- *Skin and Bones*, di Thorne Smith (1933). Un uomo che sperimenta sostanze chimiche fluorescenti, con il contributo di una grande quantità di alcol, si trasforma in uno scheletro vivente. La gente ne è meno sconvolta di quello che si penserebbe.
- *Beyond the Spectrum*, di Arthur Leo Zagat (1934). Tentativi di perforazione alla ricerca dell'acqua in una città della Florida in crescita liberano invece mostri invisibili intelligenti dalle profondità della Terra.
- *The Invisible Bomber*, di Lieutenant John Pease (1938). Uno scienziato ha inventato un metodo per scivolare fra gli universi, che lo rende invisibile, e ha attrezzato un aereo con questa tecnologia. La venderà agli Stati Uniti… ma c'è un prezzo da pagare.
- *Sinister Barrier*, di Eric Frank Russell (1939) [trad. it. *Schiavi degli invisibili*, in *Urania*, n. 7, 1953]. Alcuni scienziati scoprono un metodo per vedere nell'infrarosso profondo e scoprono che esistono esseri invisibili che controllano l'umanità. Quegli esseri non hanno alcuno scrupolo a uccidere esseri umani, pur di mantenere il controllo. Un classico della fantascienza.

- *Cloak of Aesir*, di Don A. Stuart (1939) [trad. it. *Il mantello di Aesir*, in Isaac Asimov, Martin H. Greenberg, *Storie della fantascienza – Volume 1, 1939-1943*, Mondadori, Milano 2022]. In un lontano futuro, l'umanità è stata conquistata dagli alieni Sarn. Un essere misterioso chiamato Aesir, con un mantello di oscurità invulnerabile, chiede la libertà per gli umani. I Sarn inviano agenti dotati di invisibilità a scoprire il segreto di Aesir.
- *In the Walls of Eryx*, di H.P. Lovecraft (1939) [trad. it. *Nel labirinto di Eryx*, in H.P. Lovecraft, *Tutti i racconti*, Mondadori, Milano 2015]. Un ricercatore minerario su Venere scopre un labirinto invisibile costruito dai nativi. L'avidità ha la meglio su di lui e si trova intrappolato all'interno, con la scorta di ossigeno che si va esaurendo.
- *The Invisible Robinhood*, di Eando Binder (1939). Un storia di proto-supereroi: un uomo scopre il segreto dell'invisibilità in un incidente di laboratorio e lo usa per gettare lo sgomento nel cuore dei criminali. L'invisibilità sembra spiegata in qualche modo con l'effetto fotoelettrico.
- *The Invisible World*, di Ed Earl Repp (1940). Che ne dite di un intero mondo invisibile? Viaggiatori nello spazio sospettano che un signore della guerra abbia una base nascosta su un asteroide invisibile all'esterno.
- *Slan*, di A.D. van Vogt (1940) [in italiano pubblicato in varie edizioni: con il titolo *Il segreto degli Slan* in *Urania* n. 8, Mondadori, Milano 1953; poi, con il titolo *Slan*, Nord, Milano 1971 e 1989; la citazione all'inizio del Capitolo 5 è tratta da quest'ultima]. Una razza di mutanti con intelligenza, forza e poteri psichici superiori, gli Slan, ha difficoltà a sopravvivere in un mondo in cui gli umani li stermina a vista. Il protagonista inventa una nave spaziale che rimane invisibile "disintegrando"

tutta la luce che la raggiunge, un meccanismo che fa pensare all'interferenza distruttiva e alle sorgenti non radianti.

- *The Elixir of Invisibility*, di Henry Kuttner (1940). Una commedia dell'invisibilità. Richard Rayleigh, assistente del dottor Meek, viene convinto ad assumere il nuovo elisir dell'invisibilità di Meek, come spunto pubblicitario. Quando si scopre che una banca è stata rapinata da un uomo invisibile proprio mentre era invisibile Rayleigh, iniziano i guai.
- *Invisible One*, di Neil R. Jones (1940). Nel ventiseiesimo secolo, un uomo accetta di essere reso invisibile dai membri di una setta per salvare la moglie, che è stata rapita da un pirata spaziale.
- *Priestess of the Moon*, di Ray Cummings (1940). Arrivando dalla Luna, i luniti utilizzano la tecnologia dell'invisibilità per rapire le donne della Terra. Un racconto pazzo come sembra.
- *The Visible Invisible Man*, di William P. McGivern (1940). Il mite Oscar Doolittle finisce nei guai a causa degli esperimenti con una crema che lo fa apparire e scomparire in modo casuale. Le cose si mettono particolarmente male, perché succede quando è accusato di furto alla banca presso la quale lavora.
- *Land of the Shadow Dragons*, di Eando Binder (1941). Il ritorno dell'"invisibile Robinhood" che si reca in una valle remota piena di animali invisibili, compreso un invisibile T-Rex.
- *The Invisible Dove Dancer of Strathpheen Island*, di John Collier (1941). Un americano in visita in un'isola dell'Irlanda si convince che lì esista un'invisibile "danzatrice delle colombe", visibile solo dagli uccelli appollaiati sul suo corpo, e si ripromette di sposarla. Le cose non vanno come vorrebbe. Ispirato da Rosita Royce, danzatrice delle colombe esibitasi alla Fiera mondiale di New York del 1939. Mentre danzava, le colombe volavano via portando con sé un pezzo del suo vestito.

- *Invisible Men of Mars*, di Edgar Rice Burroughs (1941) [trad. it. *Gli uomini invisibili di Marte*, in *Liana di Gathol*, Nord, Milano 1982]. Racconto della serie con protagonista John Carter di Marte, l'ultimo pubblicato mentre l'autore era ancora in vita. John Carter e sua nipote sono catturati da una città i cui abitanti hanno sviluppato la scienza dell'invisibilità.
- *The Chameleon Man*, di William P. McGivern (1942). Una storia umoristica, non proprio sull'invisibilità, che parla di un uomo tanto poco interessante da acquisire letteralmente la capacità camaleontica di fondersi con l'ambiente circostante.
- *The Little Man Who Wasn't All There*, di Robert Bloch (1942). Una storia comica su un uomo che prende a prestito il soprabito di un mago e si rende parzialmente invisibile. L'invisibilità viene spiegata vagamente come dovuta a una sorta di trattamento chimico.
- *Ghost Planet*, di Thorne Lee (1943). Un altro pianeta invisibile, ma questa volta tutto il pianeta è letteralmente invisibile, non rivestito di un mantello dell'invisibilità. Il sole del pianeta rende tutto invisibile e gli eroi fuggono quando una scottatura solare rende invisibili anche loro.
- *The Handyman*, di Lester Barclay (1950). Un ragazzo con un padre rigido ha un amico invisibile che può aiutarlo nei suoi compiti e che si rivela essere molto reale. Una storia fantastica, più che di fantascienza.
- *Love in the Dark*, di H.L. Gold (1951). Una donna, intrappolata in un matrimonio infelice, è corteggiata da un nuovo ammiratore, che guarda caso è invisibile.
- *You Can't See Me*, di William F. Temple (1951). Un uomo è sempre più turbato perché sembra che tutti abbiano un nuovo

amico invisibile, tranne lui. Un'altra storia "non proprio di invisibilità", ma comunque un racconto divertente di fantascienza.

- *War with the Gizmos*, di Murray Leinster (1958) [trad. it. *Questo è un Gizmo*, in *Urania* n. 284, Mondadori, Milano 1962]. L'umanità è attaccata da una specie misteriosa di esseri fatti di gas, e per questo invisibili. I fortunati sopravvissuti ai primi attacchi devono correre ad avvertire la civiltà umana.
- *The Invisible Man Murder Case*, di Henry Slesar (1958) [trad. it. *Il caso dell'assassino invisibile*, in Isaac Asimov, Charles G. Waugh, Martin H. Greenberg (a cura di), *I 7 peccati morali della FS*, Urania n. 832, Mondadori, Milano 1982].
- *For Love*, di Algis Budrys (1962) [trad. it. *Per amore*, in *Galaxy* 65, 10, 1963]. Un'enorme nave aliena scende sulla Terra per effettuare delle riparazioni e prende possesso del mondo in superficie, mentre l'umanità è costretta per decenni a nascondersi nel sottosuolo. Per riuscire a liberarsi, l'umanità costruisce un veicolo invisibile che dovrà sganciare una bomba a fusione direttamente sulla nave aliena, altrimenti intoccabile.
- *Memoirs of an Invisible Man*, di H.F. Saint (1987) [trad. it. *Ricordi di un uomo invisibile*, Mondadori, Milano 1987]. I ricordi di un uomo che diventa invisibile a causa di un incidente in laboratorio e deve capire come vivere la propria vita. Ne è stato ricavato un film (*Avventure di un uomo invisibile*), diretto da John Carpenter nel 1992.
- *Let's Get Invisible!*, di R.L. Stine (1993) [trad. it. *1,2,3… Invisibile!*, Mondadori, Milano 1995]. Un libro della collana per ragazzi "Goosebumps" [letteralmente: "pelle d'oca", in italiano pubblicata con il titolo "Piccoli brividi"]. Un ragazzo trova uno specchio che può renderlo invisibile, e ovviamente si caccia in guai di ogni genere.

- *Mission Invisible*, di Ulf Leonhardt (2020). Un romanzo e un libro di viaggio sulla scienza e l’invisibilità, scritto da uno dei fondatori della scienza dei mantelli dell’invisibilità.

Portare a termine questo libro doveva essere più facile, rispetto al mio precedente, in gran parte perché l'argomento mi è molto più familiare, ma la pandemia ha reso tutto più difficile, mentalmente ed emotivamente. Per questo vorrei ringraziare le molte persone che mi hanno aiutato a superare questi due anni difficili, e tutti quelli che in vario modo hanno contribuito a fare del libro quello che è oggi.

Innanzitutto ringrazio Szabo, Darlene, Damon Diehl e Taco Visser per la loro amicizia. Ringrazio anche, come sempre, la mia coach di pattinaggio, Tappie Dellinger, e il mio maestro di chitarra, Toby Watson, per avermi procurato una distrazione con hobby divertenti. Un grazie speciale a uno dei miei amici di più lunga data, Eric Smith, con le mie scuse per non essere stato più spesso in contatto.

Durante la pandemia ho giocato molto online a Dungeons and Dragons, il che mi ha consentito di non impazzire, e ringrazio i quattro (!) gruppi con cui ho giocato: tutte le persone coinvolte ora sono buone amiche, se non lo erano già. Grazie a Donna Lanclos, Mindy Weisberger, Dani Marzano, Brad Craddock, Chip Dellinger e Rachel Parsons della mia campagna "Dragon", e Lali DeRosier, Lisa Manglass, Al Houghton, Josh Witten, Nathan Taylor e Ashley Gunnet della mia campagna "Avernus". Un grazie speciale anche a Hugo González, che gestisce due giochi a cui partecipo, e gli altri giocatori partecipanti: Josh Witten (di nuovo), Samantha Hancox-Li, Scott Sutherland, Jean-Sebastien Lodge e Jim Phoel.

Faccio parte di una comunità online vivace e premurosa, che è stata fonte di sostegno e di divertimento nei momenti migliori e in quelli peggiori. Ringrazio tutti gli amici online perché sono stati presenti per me. Vorrei ringraziare in particolare alcune persone, che hanno parlato regolarmente con me e sono state di grandissimo sostegno: Isla Anderson, Alex Arreola, Nicole Fellouris, Averie Maddox, Lyndell Bade, Brenda Saldana, Samantha Stever, Siiri Takala, Charles Payet, Jacque Gonzales, Brian Malow, Kathy Kerner, Lexie Ali e bhaal spawn. Sono sicuro che, non appena il libro andrà in stampa, mi verranno in mente altri nomi che avrei dovuto includere, perciò chiedo scusa a tutti in anticipo.

Un grazie speciale a Jim Hathaway, uno dei primi e più costanti sostenitori dei miei sforzi di comunicazione della scienza quando ero un docente agli inizi. Senza il supporto di Jim questo libro probabilmente non sarebbe mai stato scritto.

Ringrazio la dottoressa Beth Archer per essersi presa cura della mia salute mentale e fisica nel corso di questi due anni caotici.

Come sempre, ringrazio i miei genitori, John Gbur e Patricia Gbur, per il loro amore e il loro sostegno.

Durante la scrittura del libro ho contattato numerosi scienziati per intervistarli e ottenere informazioni. Ringrazio il professor John Pendry dell'Imperial College e il professor Ulf Leonhardt del Weizmann Institute of Science per avere dedicato generosamente del tempo a rispondere alle mie domande. Ringrazio anche il professor Susumu Tachi dell'Università di Tokyo e David Smith della Duke University per avermi concesso di utilizzare alcune immagini.

Un grazie speciale a Wildside Press e alla Virginia Kidd Agency per la generosa autorizzazione a utilizzare citazioni sull'invisibilità dalle opere dei loro autori, contribuendo a che il libro diventasse come lo avevo pensato inizialmente.

Infine, grazie a Mary Pasti, Jean Thomson Black, Laura Jones Dooley ed Elizabeth Sylvia della Yale University Press per il loro aiuto nel processo di pubblicazione del libro e per aver contribuito a renderlo il migliore possibile.

- Adams, Douglas e Mark Carwardine, *Last Chance to See*, Ballantine Books, New York 1992 [trad. it. *L'ultima occasione*, Mondadori, Milano 2016].
- Alam, Mohammad-Reza, "Broadband Cloaking in Stratified Seas" in *Physical Review Letters*, 108, 2012, 084502.
- Alù, Andrea e Nader Engheta, "Achieving Transparency with Plasmonic and Metamaterial Coatings" in *Physical Review E 72*, 2005, 016623.
- Alù, Andrea, Nader Engheta, "Cloaking a Sensor" in *Physical Review Letters*, 102, 2009, 233901.
- Anderson, Anthony F., "Forces of Inspiration" in *New Scientist,* 11 giugno 1981, pp. 712-713.
- Apollodoro, *Biblioteca*, Traduzione di Giulio Guidorizzi, con il commento di J. G. Frazer, Adelphi, Milano 1995.
- Arago, M., "Biographical Memoir of Dr. Thomas Young" in *Edinburgh New Philosophical Journal*, 20, 1836, pp. 213-240.
- Ball, Philip, "Bending the Laws of Optics with Metamaterials: An Interview with John Pendry" in *National Science Review*, 5, 2018, pp. 200-202.
- Ball, Philip, "'Invisibility Cloak' Hides Cats and Fish" in *Nature,* 11 giugno 2013, https://doi.org/10.1038/nature.2013.13184.

- Ball, Philip, “Invisibility Cloaks Are in Sight” in *Nature News,* 25 maggio 2006, https://doi.org/10.1038/news060522-18.
- Bierce, Ambrose, *The Damned Thing* in *Town Topics*, New York 7 dicembre 1893 [trad. it. *La cosa maledetta*, in *Tutti i racconti vol. 1. I racconti dell’orrore*, Fanucci, Roma 2005, pp. 119-130].
- Bleistein, Norman e Norbert N. Bojarski, *Recently Developed Formulations of the Inverse Problem in Acoustics and Electromagnetics*, Denver Research Institute, Division of Mathematical Sciences, 1974.
- Bleistein, Norman e Jack K. Cohen, “Nonuniqueness in the Inverse Source Problem in Acoustics and Electromagnetics” in *Journal of Mathematical Physics*, 18, 1977, pp. 194-201.
- Bohm, D. e M. Weinstein, “The Self-Oscillations of a Charged Particle” in *Physical Review*, 74, 1948, pp.1789-1798.
- Bohr, Niels, “On the Constitution of Atoms and Molecules” in *Philosophical Magazine*, 26, 1913, pp.1-24.
- Bojarski, Norbert N., “Inverse Scattering Inverse Source Theory” in *Journal of Mathematical Physics*, 22, 1981, pp.1647-1650.
- Bostwick, A. E., “‘Seeing’ with X-Rays” in *Courier-News*, Bridgewater, N.J., 27 maggio 1896, p. 7.
- Boyle, Alan, *Here’s How to Make an Invisibility Cloak*, NBCnews.com, 25 maggio 2006, https://www.nbcnews.com/id/wbna12961080.
- Broglie, Louis de, “The Wave Nature of the Electron” in *Nobel Lectures: Physics*, 1922-1941, pp. 244-256, Elsevier, Amsterdam 1965.
- Brooke, James, “Tokyo Journal; Behold, the Invisible Man, If Not Seeing Is Believing”, *New York Times*, 27 marzo 2003.
- [Brougham, Henry,] “An Account of Some Cases of the Production of Colours Not Hitherto Described” in *Edinburgh*

Review, 1, 1803, pp. 457-460.

- Brougham, Henry, “The Bakerian Lecture on the Theory of Light and Colours” in *Edinburgh Review*, 1, 1803, pp. 450-456.
- Brûlé, Stéphane, Stefan Enoch e Sébastien Guenneau, “Role of Nanophotonics in the Birth of Seismic Megastructures” in *Nanophotonics*, 8, 2019, pp. 1591-1605.
- Brûlé, S., E. H. Javelaud, S. Enoch e S. Guenneau, “Experiments on Seismic Metamaterials: Molding Surface Waves” in *Physical Review Letters*, 112, 2014, 133901.
- Campbell, Lewis e William Garnett, *The Life of James Clerk Maxwell*, Macmillan, London 1882.
- Carroll, Lewis, *Alice’s Adventures in Wonderland*, 1865 [trad. it. *Alice nel Paese delle meraviglie*, Garzanti, Milano 1975].
- Castaldi, Giuseppe, Ilaria Gallina, Vincenzo Galdi, Andrea Alù e Nader Engheta, “Cloak/Anti-Cloak Interactions” in *Optics Express*, 17, 2009, pp. 3101-3114.
- Chen, Huanyang e C. T. Chan, “Acoustic Cloaking in Three Dimensions Using Acoustic Metamaterials” in *Applied Physics Letters*, 91, 2007, 183518.
- Chen, Huanyang, Xudong Luo, Hongru Ma e C. T. Chan, “The Anti-Cloak” in *Optics Express*, 16, 2008, pp. 14603-14608.
- Chen, Huanyang, Rong-Xin Miao e Miao Li, “Transformation Optics That Mimics the System outside a Schwarzschild Black Hole” in *Optics Express*, 18, 2010, pp. 15183-15188.
- Chen, Huanyang, Bae-Ian Wu, Baile Zhang e Jin Au Kong, “Electromagnetic Wave Interactions with a Metamaterial Cloak” in *Physical Review Letters*, 99, 2007, 063903.
- Chen, Huanyang, Bin Zheng, Lian Shen, Huaping Wang, Xianmin Zhang, Nikolay I. Zheludev e Baile Zhang, “Ray-Optics

Cloaking Devices for Large Objects in Incoherent Natural Light” in *Nature Communications*, 4, 2013, p. 2652.

- Chen, Xianzhong, Yu Luo, Jingjing Zhang, Kyle Jiang, John B. Pendry e Shuang Zhang, “Macroscopic Invisibility Cloaking of Visible Light” in *Nature Communications*, 2, 2011, p. 176.
- Cho, Adrian, “High-Tech Materials Could Render Objects Invisible” in *Science*, 312, 2006, p. 1120.
- Chu, Jennifer, *MIT Engineers Develop ‘Blackest Black’ Material to Date*, MIT News, 12 settembre 2019, http://news.mit.edu/2019/blackest-black-material-cnt-0913.
- Coldewey, Devin, *Vantablack: U.K. Firm Shows Off ‘World’s Darkest Material’*, NBC News, 14 luglio 2014, http://www.nbcnews.com/science/science-news/vantablack-u-k-firm-shows-worlds-darkest-material-n155581.
- Colombi, Andrea, Philippe Roux, Sébastien Guenneau, Philippe Gueguen e Richard V. Craster, “Forests as a Natural Seismic Metamaterial: Rayleigh Wave Bandgaps Induced by Local Resonances” in *Scientific Reports*, 6, 2016, 19238.
- Conway, Arthur William, “Professor G. A. Schott, 1868-1937” in *Obituary Notices of Fellows of the Royal Society*, 2, 1939, pp. 451-454.
- Cormack, Allan M., *Nobel Lecture*, NobelPrize.org, http://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1979/cormack/lecture/.
- Coxworth, Ben, “New Chemical Reagent Turns Biological Tissue Transparent” in *New Atlas,* 2 settembre 2011, https://newatlas.com/chemical-reagent-turns-biological-tissue-transparent/19708/.
- Cummer, Steven A., Bogdan-Ioan Popa, David Schurig, David R. Smith, John Pendry, Marco Rahm e Anthony Starr, “Scattering

Theory Derivation of a 3D Acoustic Cloaking Shell” in *Physical Review Letters*, 100, 2008, 024301.

- Cummer, Steven A. e David Schurig, “One Path to Acoustic Cloaking” in *New Journal of Physics*, 9, 2007, p. 45.
- Devaney, A. J., “Nonuniqueness in the Inverse Scattering Problem” in *Journal of Mathematical Physics*, 19, 1978, pp. 1526-1531.
- Devaney, A. J. e G.C. Sherman, “Nonuniqueness in Inverse Source and Scattering Problems” in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 30, 1982, 1034-37.
- Devaney, A. J. e E. Wolf, “Radiating and Nonradiating Classical Current Distributions and the Fields They Generate” in *Physical Review*, D 8, 1973, pp. 1044-1047.
- DeVito, Carl L., *Science, SETI, and Mathematics*, Berghahn Books, New York 2014.
- Diaz, Johnny, “Teenager Wins Th25,000 for Science Project That Solves Blind Spots in Cars” in *New York Times,* 7 novembre 2019.
- Dirac, Paul Adrien Maurice, “Quantised Singularities in the Electromagnetic Field” in *Proceedings of the Royal Society,* A 133, 1931, pp. 60-72.
- Doyle, A. Conan, “The Adventure of the Abbey Grange” in *Strand*, settembre 1904, pp. 243-256 [trad. it. “L’avventura di Abbey Grange” in *Tutto Sherlock Holmes*, Newton Compton, Roma 2015].
- Dysthe, Kristian, Krogstad, Harald E. e Peter Müller, “Oceanic Rogue Waves” in *Annual Review of Fluid Mechanics*, 40, 2008, pp. 287-310.
- Easley, Alexis e Shannon Scott, (a cura di) *Terrifying Transformations: An Anthology of Victorian Werewolf Fiction,*

Valancourt Books, Kansas City, Mo. 2013.

- “Edison Fears Hidden Perils of the X-Rays” in *New York World*, 3 agosto 1903.
- “Edison Says There Is Hope” in *San Francisco Examiner*, 19 novembre 1896, p. 5.
- Ehrenfest, Paul, “Ungleichförmige Elektrizitätsbewegungen ohne Magnetund Strahlungsfeld” in *Physikalische Zeitschrift*, 11, 1910, pp. 708-709.
- Einstein, A., “Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen” in *Annalen der Physik*, 332, 1905, pp. 549-560.
- Einstein, A., “Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt” in *Annalen der Physik*, 332, 1905, pp. 132-148.
- Ergin, Tolga, Nicholas Stenger, Patrice Brenner, John B. Pendry e Martin Wegener, “Three-Dimensional Invisibility Cloak at Optical Wavelengths” in *Science*, 328, 2010, pp. 337-339.
- Fang, Nicholas, Hyesog Lee, Cheng Sun e Xiang Zhang, “Sub-Diffraction-Limited Optical Imaging with a Silver Superlens” in *Science*, 308, 2005, pp. 534-537.
- Faraday, Michael, “III. Experimental Researches in Electricity, Twenty-Eighth Series” in *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 142, 1852, pp. 25-56.
- Faraday, Michael V., “Experimental Researches in Electricity” in *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 122, 1832, pp. 125-162.
- Faraday, Michael V., “XXIII. A Speculation Touching Electric Conduction and the Nature of Matter” in *London, Edinburgh, and*

Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 24, 1844, pp. 136-144.

- Farhat, M., S. Enoch, S. Guenneau e A.B. Movchan, “Broadband Cylindrical Acoustic Cloak for Linear Surface Waves in a Fluid” in *Physical Review Letters*, 101, 2008, 134501.
- Farhat, M., S. Guenneau e S. Enoch, “Ultrabroadband Elastic Cloaking in Thin Plates” in *Physical Review Letters*, 103, 2009, 024301.
- Frankel, R. I., “Centennial of Rontgen’s Discovery of X-Rays” in *Western Journal of Medicine*, 164, 1996, pp. 497-501.
- Gamliel, A., K. Kim, A. I. Nachman e E. Wolf, “A New Method for Specifying Nonradiating Monochromatic Sources and Their Fields” in *Journal of the Optical Society of America A*, 6, 1989, pp. 1388-1393.
- García-Meca, C., M. M. Tung, J. V. Galán, R. Ortuño, F. J. Rodríguez-Fortuno, J. Martí e A. Martínez, “Squeezing and Expanding Light without Reflections via Transformation Optics” in *Optics Express*, 19, 2011, pp. 3562-3575.
- Gbur, Greg, *Nonradiating Sources and the Inverse Source Problem*, tesi di dottorato, Università di Rochester, 2001.
- Gbur, Greg e Emil Wolf, “Sources of Arbitrary States of Coherence That Generate Completely Coherent Fields outside the Source” in *Optics Letters*, 22, 1997, pp. 943-945.
- Genov, Dentcho A., Shuang Zhang e Xiang Zhang, “Mimicking Celestial Mechanics in Metamaterials” in *Nature Physics*, 5, 2009, pp. 687-692.
- Gernsback, H., “Can We Make Ourselves Invisible?” in *Science and Invention*, 8, 1921, p. 1074.
- Goedecke, G. H., “Classically Radiationless Motions and Possible Implications for Quantum Theory” in *Physical Review*, 135,

1964, pp. B281-288.
- Gömöry, Fedor, Mykola Solovyov, Ján Šouc, Carles Navau, Jordi Prat-Camps e Alvaro Sanchez, “Experimental Realization of a Magnetic Cloak” in *Science*, 335, 2012, pp. 1466-1468.
- Gonzalez, Robbie, “A Chemical That Can Turn Your Organs Transparent” in *Gizmodo*, 1 settembre 2011, https://gizmodo.com/a-chemical-that-can-turn-your-organs-transparent-5836605.
- Grbic, Anthony e George V. Eleftheriades, “Overcoming the Diffraction Limit with a Planar Left-Handed Transmission-Line Lens” in *Physical Review Letters*, 92, 2004, 117403.
- Greenleaf, Allan, Yaroslav Kurylev, Matti Lassas e Gunther Uhlmann, “Electromagnetic Wormholes and Virtual Magnetic Monopoles from Metamaterials” in *Physical Review Letters*, 99, 2007, 183901.
- Greenleaf, Allan, Matti Lassas e Gunther Uhlmann, “Anisotropic Conductivities That Cannot Be Detected by EIT” in *Physiological Measurement*, 24, 2003, pp. 413-419.
- Guenneau, Sebastien, Claude Amra e Denis Veynante, “Transformation Thermodynamics: Cloaking and Concentrating Heat Flux” in *Optics Express*, 20, 2012, pp. 8207-8218.
- Hama, Hiroshi, Hiroshi Kurokawa, Hioyuki Kawano, Ryoko Ando, Tomomi Shimogori, Hisayori Noda, Kiyoko Fukami, Asako Sakaue-Sawano e Atsushi Miyawaki. “Scale: A Chemical Approach for Fluorescence Imaging and Reconstruction of Transparent Mouse Brain” in *Nature Neuroscience*, 14, 2011, pp. 1481-1488.
- Hapgood, Fred e Andrew Grant, “Metamaterial Revolution: The New Science of Making Anything Disappear” in *Discover Magazine*, aprile 2009.

- Hashemi, Hila, Cheng Wei Qiu, Alexander P. McCauley, J.D. Joannopoulos e Steven G. Johnson, “Diameter-Bandwidth Product Limitation of Isolated-Object Cloaking” in *Physical Review A*, 86, 2012, 013804.
- Herschel, William XIII, “Investigation of the Powers of the Prismatic Colours to Heat and Illuminate Objects; with Remarks, That Prove the Different Refrangibility of Radiant Heat. To Which Is Added an Inquiry into the Method of Viewing the Sun Advantageously, with Telescopes of Large Apertures and High Magnifying Powers” in *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 90, 1800, pp. 255-283.
- Herschel, William XIII, “XIV. Experiments on the Refrangibility of the Invisible Rays of the Sun” in *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 90, 1800, pp. 284-292.
- Hertz, Heinrich, *Electric Waves*; *Being Researches on the Propagation of Electric Action with Finite Velocity through Space*, traduzione di D. E. Jones, 1895, ristampa Dover, New York 1962.
- Hirshfeld, Alan, *The Electric Life of Michael Faraday*, Walker, New York 2006.
- Hounsfield, G. N., “Computerized Transverse Axial Scanning (Tomography): Part I. Description of System” in *British Journal of Radiology*, 46, 1973, pp. 1016-1022.
- James, R. W., *The Optical Principles of the Diffraction of X-Rays*, G. Bell and Sons, London 1948.
- “Japanese Scientist Invents ‘Invisibility Coat’” in *BBC News World Edition*, 18 febbraio 2003, http://news.bbc.co.uk/2/hi/asia-pacific/2777111.stm.
- Jeans, J. H., “On the Constitution of the Atom” in *Philosophical Magazine*, 11, 1906, pp. 604-607.

- Jiang, Wei Xiang, Hui Feng Ma, Qiang Cheng e Tie Jun Cui, "Illusion Media: Generating Virtual Objects Using Realizable Metamaterials" in *Applied Physics Letters*, 96, 2010, 121910.
- Jones, Bence, *The Life and Letters of Faraday*, J. B. Lippincott, Philadelphia 1870, 2 voll.
- Kaye, G. W. C., *X Rays,* Longmans, Green, London 1918.
- Kerker, Milton, "Invisible Bodies" in *Journal of the Optical Society of America*, 65, 1975, pp. 376-379.
- Kim, Kisik e Emil Wolf, "Non-Radiating Monochromatic Sources and Their Fields" in *Optics Communications*, 59, 1986, pp 1-6.
- Kim, Sang-Hoon e Mukunda P. Das, "Seismic Waveguide of Metamaterials" in *Modern Physics Letters B*, 26, 2012, 1250105.
- Kwon, Do-Hoon e Douglas H. Werner, "Transformation Optical Designs for Wave Collimators, Flat Lenses and Right-Angle Bends" in *New Journal of Physics*, 10, 2008, 115023.
- Lai, Yun, Huanyang Chen, Zhao-Qing Zhang e C. T. Chan, "Complementary media invisibility cloak that cloaks objects at a distance outside the cloaking shell" in *Physical Review Letters*, 102, 2009, 093901.
- Lai, Yun, Jack Ng, HuanYang Chen, DeZhuan Han, JunJun Xiao, Zhao-Qing Zhang e C.T. Chan, "Illusion Optics: The Optical Transformation of an Object into Another Object" in *Physical Review Letters*, 102 (2009): 253902.
- Lenard, P, "Über die Absorption der Kathodenstrahlen verschiedener Geschwindigkeit" in *Annalen der Physik*, 12, 1903, pp. 714-744.
- Leonhardt, Ulf, "Optical Conformal Mapping" in *Science*, 312, 2006, pp. 1777-1780.
- Leonhardt, U. e P. Piwnicki, "Optics of Nonuniformly Moving Media" in *Physical Review A*, 60, 1999, pp. 4301-4312.

- Li, Jensen e J.B. Pendry, “Hiding under the Carpet: A New Strategy for Cloaking” in *Physical Review Letters*, 101, 2008, 203901.
- Lie, R., C. Ji, J. J. Mock, J. Y. Chin, T. J. Cui e D.R. Smith, “Broadband Ground-Plane Cloak” in *Science*, 323, 2009, pp. 366-369.
- Liszewski, Andrew, “Museum Visitor Falls into Giant Hole That Looks Like a Cartoonish Painting on the Floor”, *Gizmodo*, 20 agosto 2018, https://gizmodo.com/museum-visitor-falls-into-giant-hole-that-looks-like-a-1828462859.
- London, Jack, *The Shadow and the Flash* in *Windsor Magazine*, 24, 1906, pp. 354-362 [trad. it. L*’ombra e il baleno*, in *L’ombra e il baleno. Cinque racconti scelti da J.L Borges*, Marietti, Torino 1992].
- Luo, Xudong, Tao Yang, Yongwei Gu, Huanyang Chen e Hongru Ma, “Conceal an Entrance by Means of Superscatterer” in *Applied Physics Letters*, 94, 2009, 223513.
- Magnus, F., B. Wood, J. Moore, K. Morrison, G. Perkins, J. Fyson, M. C. K. Wiltshire, D. Caplin, L. F. Cohen e J.B. Pendry, “A d.c. Magnetic Material” in *Nature Materials*, 7, 2008, pp. 295-297.
- Markov, Petr, Jason G. Valentine e Sharon M. Weiss, “Fiber-to-Chip Coupler Designed Using an Optical Transformation” in *Optics Express*, 20, 2012, pp. 14705-14713.
- Maupassant, Guy de, *Le Horla* in *Gil Blas,* 26 ottobre 1886 [trad. it. *L’Horla*, prima versione, in Guy de Maupassant, *Racconti dell’incubo e del mistero*, Feltrinelli, Milano 2019, pp. 140-149).
- Markov, Petr, Jason G. Valentine, Sharon M.Weiss, *Le Horla*, Paul Ollendorff, Paris 1887 [trad. it. *L’Horla*, in Guy de

Maupassant, *Racconti dell'incubo e del mistero*, Feltrinelli, Milano 2019, pp. 158-184).

- Markov, Petr, Jason G. Valentine e Sharon M. Weiss, *The Works of Guy de Maupassant*, Classic, London 1911, 4 voll.
- Maurel, Agnes, Jean-Jacques Marigo, Kim Pham e Sebastien Guenneau, "Conversion of Love Waves in a Forest of Trees" in *Physical Review B*, 98, 2018, 134311.
- Maxwell, J.C., "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field" in *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 155, 1865, pp. 459-512.
- Maxwell, J.C., "On Faraday's Lines of Force" in *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 10, 1855, pp. 155-229.
- Maxwell, J.C., *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Clarendon Press, Oxford 1892 [trad. it. *Trattato di elettricità e magnetismo*, a cura di Evandro Agazzi, UTET, Torino 1973, 2 voll.].
- Maxwell, J.C., "III. On Physical Lines of Force" in *London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 23, 1862, pp. 12-24.
- Maxwell, J.C., "XVIII.-Experiments on Colour, as Perceived by the Eye, with Remarks on Colourblindness" in *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 21, 1857, pp. 275-298.
- Maxwell, J.C., XXV. "On Physical Lines of Force" in *London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 21, 1861, pp. 161-175.
- Maxwell, J.C. e Forbes, I., "On the Description of Oval Curves, and Those Having a Plurality of Foci" in *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 2, 1951, pp. 89-91.
- Mercedes-Benz, *Mercedes-Benz Invisible Car*, 2012, https://www.youtube.com/watch?v=TYlXpnPTbqQ.

- Merritt, A., *The Face in the Abyss*, Horace Liveright, New York 1931 [trad. it. *Il volto nell'abisso*, Fanucci, Roma 1981].
- Michelson, A.A., *Light Waves and Their Uses*, University of Chicago Press, Chicago 1903.
- Milton, K.A., "Theoretical and Experimental Status of Magnetic Monopoles" in *Reports on Progress in Physics*, 69, 2006, pp. 1637-1711.
- Mitchell, Edward Page, "The Crystal Man" in *New York Sun*, 30 gennaio 1881.
- Mizuno, Kohei, Juntaro Ishii, Hideo Kishida, Yuhei Hayamizu, Satoshi Yasuda, Don N. Futaba, Motoo Yumura e Kenji Hata. "A Black Body Absorber from Vertically Aligned Single-Walled Carbon Nanotubes" in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 2009, pp. 6044-6047.
- Monticone, Francesco e Andrea Alù, "Do Cloaked Objects Really Scatter Less?" in *Physical Review X*, 3, 2013, 041005.
- Moses, H.E., "Solution of Maxwell's Equations in Terms of a Spinor Notation: The Direct and Inverse Problem" in *Physical Review*, 113, 1959, pp. 1670-1679.
- Nachman, Adrian I., "Reconstructions from Boundary Measurements" in *Annals of Mathematics*, 128, 1988, pp. 531-576.
- Nagaoka, H., "LV. Kinetics of a System of Particles Illustrating the Line and the Band Spectrum and the Phenomena of Radioactivity" in *London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 7, 1904, pp. 445-455.
- Nash, Leonard K., "The Origin of Dalton's Chemical Atomic Theory" in *Isis*, 47, 1956, pp. 101-116.
- Nauenberg, Michael, "Max Planck and the Birth of the Quantum Hypothesis" in *American Journal of Physics*, 84, 2016, pp. 709-

720.

- Navau, Carles, Du-Xing Chen, Alvaro Sanchez e Nuria Del-Valle, “Magnetic Properties of a dc Meta-Material Consisting of Parallel Square Superconducting Thin Plates” in *Applied Physics Letters*, 94, 2009, 242501.
- Newton, Sir Isaac, *Opticks; or, A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*, William and John Innys, London 1730[4] [trad. it. *Ottica o trattato sulle riflessioni, rifrazioni, inflessioni e sui colori della luce* in *Scritti di ottica*, a cura di Alberto Pala, UTET, Torino 1978, pp. 287-605].
- Niaz, Mansoor, Stephen Klassen, Barbara McMillan e Don Metz, “Reconstruction of the History of the Photoelectric Effect and Its Implications for General Physics Textbooks” in *Science Education*, 94, 2010, pp. 903-931.
- O’Brien, Fitz-James, *The Diamond Lens* in *Atlantic Monthly*, gennaio 1858, pp. 354-367 [trad. it. *La lente di diamante* in *La lente di diamante e altri racconti*, La casa Usher, Firenze 1992, pp. 11-37].
- O’Brien, Fitz-James, *From Hand to Mouth* in *New York Picayune*, 27 marzo-15 maggio 1858.
- O’Brien, Fitz-James, *The Lost Room* in *Harper’s New Monthly Magazine*, settembre 1858, pp. 494-500 [trad. it. *La stanza perduta*, in *La lente di diamante e altri racconti*, cit., pp. 101-119].
- O’Brien, Fitz-James, *What Was It? A Mystery* in *Harper’s New Monthly Magazine*, marzo 1859, pp. 504-509 [trad. it. *Che è stato*, in *La lente di diamante e altri racconti*, cit., pp. 155-169].
- O’Brien, Fitz-James, *The Wondersmith* in *Atlantic Monthly*, ottobre 1859, pp. 463-482 [trad. it. *Il forgiatore delle meraviglie*, in *La lente di diamante e altri racconti*, cit., pp. 38-76].

- Oersted, Hans Christian, “Experiments on the Effect of a Current of Electricity on the Magnetic Needle” in *Annals of Philosophy*, 16, 1820, pp. 273-276.
- Oersted, Hans Christian, “Thermo-Electricity” in *The Edinburgh Encyclopedia*, a cura di D. Brewster, 17, Joseph Parker, Philadelphia 1832, pp. 715-732.
- Parnell, William J., “Nonlinear Pre-Stress for Cloaking from Antiplane Elastic Waves” in *Proceedings of the Royal Society A*, 468, 2012, pp. 563-580.
- Peacock, George, *Life of Thomas Young, M.D., F.R.S., & c.,* …, John Murray, London 1855.
- Pendry, J. B., “Negative Refraction Makes a Perfect Lens” in *Physical Review Letters*, 85, 2000, pp. 3966-3969.
- Pendry, J. B., “Perfect Cylindrical Lenses” in *Optics Express*, 11, 2003, pp. 755-760.
- Pendry, J.B., A.J. Holden, D.J. Robbins e W.J. Stewart, “Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena” in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47, 1999, pp. 2075-2084.
- Pendry, J.B., A.J. Holden, W.J. Stewart e I. Youngs, “Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures” in *Physical Review Letters*, 76, 1996, pp. 4773-4776.
- Pendry, J.B. e S. Anantha Ramakrishna, “Near-Field Lenses in Two Dimensions” in *Journal of Physics: Condensed Matter*, 14, 2002, p. 8463.
- Pendry, J.B., D. Schurig e D.R. Smith, “Controlling Electromagnetic Fields” in *Science*, 312, 2006, pp. 1780-1782.
- Perrin, J.B., “Discontinuous Structure of Matter”, Nobel Lecture, 11 dicembre 1926, The Nobel Prize, http://www.nobelprize.org/prizes/physics/1926/perrin/lecture/.

- Perrin, J.B., “Les hypothèses moléculaires” in *Revue Scientifique*, 15, 1901, pp. 449-461.
- Petit, Charles, “Invisibility Uncloaked” in *Science News*, 21 novembre 2009.
- Platone, *Repubblica* in Id., *Tutti gli scritti*, a cura di Giovanni Reale, Rusconi, Milano 1991.
- Prat-Camps, Jordi, Carles Navau e Alvaro Sanchez, “A Magnetic Wormhole” in *Scientific Reports*, 5, 2015, 12488.
- Rahm, Marco, Steven A. Cummer, David Schurig, John B. Pendry e David R. Smith, “Optical Design of Reflectionless Complex Media by Finite Embedded Coordinate Transformations” in *Physical Review Letters*, 100, 2008, 063903.
- Rayleigh, Lord, “Geometrical Optics” in *Encyclopaedia Britannica*, 1884 ed.,17, pp. 798-807.
- Rayleigh, Lord, “On Electrical Vibrations and the Constitution of the Atom” in *Philosophical Magazine*, 11, 1906, pp. 117-123.
- Roberts, D.A., M. Rahm, J.B. Pendry, D.R. Smith, “Transformation-Optical Design of Sharp Waveguide Bends and Corners” in *Applied Physics Letters*, 93, 2008, 251111.
- Rogers, Adam, “Art Fight! The Pinkest Pink versus the Blackest Black” in *Wired*, 22 giugno 2017, https://www.wired.com/story/vantablack-anish-kapoor-stuart-semple/.
- Röntgen, W.C., “On a New Kind of Rays” in *Science*, 3, 1896, pp. 227-231.
- Rutherford, Ernest, “Forty Years of Physics” in *Background to Modern Science*, a cura di Joseph Needham e Walter Pagel, MacMillan, New York 1938, pp. 47-74.
- Rutherford, Ernest, “The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom” in *London, Edinburgh, and Dublin*

Philosophical Magazine and Journal of Science, 21, 1911, pp. 669-688.

- *San Francisco Examiner*, 21 gennaio 1896, p. 6.
- Schott, G.A., "The Electromagnetic Field Due to a Uniformly and Rigidly Electrified Sphere in Spinless Accelerated Motion and Its Mechanical Reaction on the Sphere, I" in *Proceedings of the Royal Society A*, 156, 1936, pp. 471-486.
- Schott, G.A., "The General Motion of a Spinning Uniformly and Rigidly Electrified Sphere, III" in *Proceedings of the Royal Society A*, 159, 1937, pp. 548-570.
- Schott, G.A., "On the Spinless Rectilinear Motion of a uniformly and rigidly electrified sphere, II" in *Proceedings of the Royal Society A*, 156, 1936, pp. 487-503.
- Schott, G.A., "The Uniform Circular Motion with Invariable Normal Spin of a Rigidly and Uniformly Electrified Sphere, IV" in *Proceedings of the Royal Society A*, 159, 1937, pp. 570-591.
- Schott, G.A., II. "On the Electron Theory of Matter and the Explanation of Fine Spectrum Lines and of Gravitation" in *London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 12, 1906, pp. 21-29.
- Schott, G.A., "V. On the Reflection and Refraction of Light" in *Proceedings of the Royal Society of London*, 5, 1894, pp. 5526-5530.
- Schott, G.A., "XXII. On Bohr's Hypothesis of Stationary States of Motion and the Radiation from an Accelerated Electron" in L*ondon, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 36, 1918, pp. 243-261.
- Schott, G.A., "LIX. The Electromagnetic Field of a Moving Uniformly and Rigidly Electrified Sphere and Its Radiationless

Orbits” in *London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 15, 1933, pp. 752-761.

- Schott, G.A., “LIX. On the Radiation from Moving Systems of Electrons, and on the Spectrum of Canal Rays” in *London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 13, 1907, pp. 657-687.
- Schott, G.A., “LXXXVIII. Does an Accelerated Electron Necessarily Radiate Energy on the Classical Theory?” in *London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 42, 1921, pp. 807-808.
- Schurig, D., J.J. Mock, B.J. Justice, S.A. Cummer, J.B. Pendry, A.F. Starr e D.R. Smith, “Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies” in *Science*, 314, 2006, pp. 977-980.
- “A Severe Strain on Credulity”, *New York Times*, 13 gennaio 1920.
- Shelby, R.A., D.R. Smith e S. Schultz, “Experimental Verification of a Negative Index of Refraction” in *Science*, 292, 2001, pp. 77-79.
- Silveirinha, Mário G., Andrea Alù e Nader Engheta, “Parallel-Plate Metamaterials for Cloaking Structures” in *Physical Review E*, 75, 2007, 036603.
- Sinclair, Carla, “Invisibility Cloak Demoed at TED2013” in *Boingboing*, 25 febbraio 2013, https://boingboing.net/2013/02/25/invisibility-cloak-demoed-at-t.html.
- Smith, David R. e Norman Kroll, “Negative Refractive Index in Left-Handed Materials” in *Physical Review Letters*, 85, 2000, pp. 2933-2236.
- Smith, D.R., W.J. Padilla, D.C. Vier, S.C. Nemat-Nasser e S. Schultz, “Composite Medium with Simultaneously Negative

Permeability and Permittivity” in *Physical Review Letters*, 84, 2000, pp. 4184-4187.

- Smith, Robert, *A Compleat System of Opticks*, Cambridge, stampa per l’autore, 1738.
- Smith, Robert, *Harmonics; or, The Philosophy of Musical Sounds*, T. J. Merrill Booksellers, Cambridge 1759.
- Smith, Thorne, *Skin and Bones*, Doubleday Doran, Garden City, N.Y. 1933.
- Sommerfeld, Arnold, *Optics*, Academic, New York 1964.
- Southey, Robert, *The Doctor*, Longman, Brown, Green and Longmans, London 1848.
- Stark, Johannes, *Prinzipien der Atomdynamik: Die Elektrischen Quanten*, Hirzel, Lipsia 1910.
- Starrett, Vincent, *Ambrose Bierce*, Walter M. Hill, Chicago 1920.
- Stenger, Nicolas, Manfred Wilhelm e Martin Wegener, “Experiments on Elastic Cloaking in Thin Plates” in *Physical Review Letters*, 108, 2012, 014301.
- Stone, W. Ross, “Nonradiating Sources of Compact Support Do Not Exist: Uniqueness of the Solution to the Inverse Scattering Problem” in *Journal of the Optical Society of America*, 70, 1980, p. 1606.
- Tachi, S., “Telexistence and Retro-Reflective Projection Technology (RPT)” in *Proceedings of the 5th Virtual Reality International Conference*, a cura di S. Richir, P. Richard, B. Taravel, 69/1–69/9, ISTIA Innovation, Angers, Francia 2003.
- Thomson, J.J., “XXIV. On the Structure of the Atom: An Investigation of the Stability and Periods of Oscillation of a Number of Corpuscles Arranged at Equal Intervals around the Circumference of a Circle; with Application of the Results to the Theory of Atomic Structure” in *London, Edinburgh, and Dublin*

Philosophical Magazine and Journal of Science, 7, 1904, pp. 237-265.

- Thone, Frank, “Cloaks of Invisibility” in *Science News-Letter*, 45, 1944, pp. 90-92.
- Tsakmakidis, K.L., O. Reshef, E. Almpanis, G.P. Zouros, E. Mohammadi, D. Saadat, F. Sohrabi, N. Fahimi-Kashani, D. Etezadi, R.W. Boyd e H. Altug, “Ultrabroadband 3D Invisibility with Fast-Light Cloaks” in *Nature Communications*, 10, 2019, p. 4859.
- Valentine, Jason, Jensen Li, Thomas Zentgraf, Guy Bartal e Xiang Zhang, “An Optical Cloak Made of Dielectrics” in *Nature Materials*, 8, 2009, pp. 568-571.
- Verne, Jules, *Le secret de Wilhelm Storitz*, Hetzel, Parigi 1910 [trad. it. *La fidanzata invisibile. Con Il segreto di Wilhelm Storitz*, Robin, Torino 2023].
- Vesalago, Viktor G., “The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ in *Soviet Physics Uspekhi*, 10, 1968, pp. 509-514.
- Ward, A.J. e J.B. Pendry, “Refraction and Geometry in Maxwell’s Equations” in *Journal of Modern Optics*, 43, 1996, pp. 773-793.
- Wells, H.G., *Experiment in Autobiography*, Little, Brown, Boston 1962.
- Wells, H.G., *The Invisible Man*, Harper and Brothers, New York 1897 [trad. it. *L’uomo invisibile*, Rizzoli BUR, Milano 1960].
- Wells, H.G., *Seven Famous Novels*, Alfred A. Knopf, New York 1934.
- Weyl, H., “Über die asymptotische Verteilung der Eigenwerte” in *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*,1911, pp. 110-117.

- Wheaton, Bruce R., “Philipp Lenard and the Photoelectric Effect, 1889–1911” in *Historical Studies in the Physical Sciences*, 9, 1978, pp. 299-322.
- Wiener, Otto, “Stehende Lichtwellen und die Schwingungsrichtung polarisirten Lichtes” in *Annalen der Physik*, 38, 1890, pp. 203-243.
- Wikipedia, s.v. *Problema inverso*, Ultima modifica 8 settembre 2023, 17:25 (UTC), https://en.wikipedia.org/wiki/Problema_inverso.
- Williamson, Jack, “Salvage in Space” in *Astounding Stories of Super-Science*, marzo 1933, pp. 6-21.
- Winter, William, *The Poems and Stories of Fitz-James O’Brien*, James R. Osgood, Boston 1881.
- Wolf, Emil, “Optics in Terms of Observable Quantities” in *Nuovo Cimento*, 12, 1954, pp. 884-888.
- Wolf, Emil, “Recollections of Max Born” in *Optics News*, 9, 1983, pp. 10-16.
- Wolf, Emil, “Three-Dimensional Structure Determination of Semi-Transparent Objects from Holographic Data” in *Optics Communications*, 1, 1969, pp. 153-156.
- Wolf, Emil e Tarek Habashy, “Invisible Bodies and Uniqueness of the Inverse Scattering Problem” in *Journal of Modern Optics*, 40, 1993, pp. 785-792.
- Wood, B. e J.B. Pendry, “Metamaterials at Zero Frequency” in *Journal of Physics: Condensed Matter*, 19, 2007, 076208.
- Wood, R.W., “The Invisibility of Transparent Objects” in *Physical Review*, 15, 1902, pp. 123-124.
- Wylie, Philip, *The Murderer Invisible*, Farrar and Rinehart, New York 1931.
- Yang, Fan, Zhong Lei Mei, Jin Tian Yu e Tie Jun Cui, “dc Electric Invisibility Cloak” in *Physical Review Letters*, 109, 2012,

053902.
- Yang, Tao, Huanyang Chen, Xudong Luo e Hongru Ma, "Superscatterer: Enhancement of Scattering with Complementary Media" in *Optics Express*, 16, 2008, pp. 18545-18550.
- Young, Thomas, *A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts*, Joseph Johnson, London 1807, Vol. 1.
- Young, Thomas, *A Reply to the Animadversions of the Edinburgh Reviewers*, Savage and Easingwood, London 1804.
- Young, Thomas, "I. The Bakerian Lecture: Experiments and Calculations relative to Physical Optics" in *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 94, 1804, pp. 1-16.
- Young, Thomas, "II. The Bakerian Lecture: On the Mechanism of the Eye" in *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 91, 1801, pp. 23-88.
- Young, Thomas, "II. The Bakerian Lecture: On the Theory of Light and Colours" in *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 92, 1802, 12-48.
- Young, Thomas, "VII. Outlines of Experiments and Inquiries Respecting Sound and Light" in *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 90, 1800, pp. 106-150.
- Young, Thomas, "XIV. An Account of Some Cases of the Production of Colours, Not Hitherto Described" in *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 92, 1802, pp. 387-397.
- Young, Thomas, "XVI. Observations on Vision" in *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 83, 1793, pp. 169-181.
- Zhang, Baile, Yuan Luo, Xiaogang Liu e George Barbastathis, "Macroscopic Invisibility Cloak for Visible Light" in *Physical Review Letters*, 106, 2011, 033901.

- Zhang, Shu, Chunguang Xia e Nicholas Fang, “Broadband Acoustic Cloak for Ultrasound Waves” in *Physical Review Letters*, 106, 2011, 024301.

Indice

Appendice B - Invisibibliografia

Ringraziamenti

Bibliografia